

Kyösti Laukkanen, Hemming Paroll, Pertti Pitkänen, Erkki Vesikari

# Siltojen kermieristysten kuplimisen estäminen

Loppuraportti



Tielaitoksen  
selvityksiä

45/1998

Helsinki 1998

TIEHALLINTO  
Siltayksikkö

Tielaitoksen selvityksiä  
45/1998

Kyösti Laukkanen, Hemming Paroll, Pertti Pitkänen, Erkki Vesikari

## **Siltojen kermieristysten kuplimisen estäminen**

Loppuraportti

**Tielaitos**  
TIEHALLINTO

Helsinki 1998



ISBN 951-726-474-7  
ISSN 0788-3722  
TIEL 3200536

Oy Edita Ab  
Helsinki 1998

Julkaisua myy:  
Tielaitos, Kirjasto  
telefax 0204 44 2652

Kansikuva: yllä sääsuojahalli,  
alla epoksitiivistyksen levitys



**Tielaitos**  
TIEHALLINTO  
Siltayksikkö  
Opastinsilta 12 A  
PL 33, 00521 HELSINKI  
Puhelinvaihte 0204 44 150

LAUKKANEN Kyösti, PAROLL Hemming, PITKÄNEN Pertti, VESIKARI, Erkki: Siltojen kermieristysten kuplimisen estäminen. Loppuraportti. Helsinki 1998, Tielaitos/ siltayksikkö, Tielaitoksen selvityksiä 45/1998.

**ASIASANAT** silta, vedeneristys, kumibitumi, kermi, betoni, kosteus, lämpötila, kupliminen, vaurio

## TIIVISTELMÄ

Tutkimuksen tavoitteena oli löytää syy-yhteydet siltojen kermieristysten kuplimisilmiön syntyyn ja tuottaa tarvittava tieto muutosten tekemiseksi siltojen rakennus- ja korjausasiakirjoihin. Tutkimuksen taustalla oli kermieristysten kuplimisen lisääntyminen 1990-luvulla sen jälkeen, kun suojabetonista luovuttiin ja siirryttiin kauttaaltaan huokostettuihin siltabetoneihin.

Tutkimus ajoittui vuosille 1996 - 98, sen rahoitti Tielaitoksen siltayksikkö ja toteuttivat VTT:n Yhdyskuntatekniikan ja Rakennustekniikan tutkimusyksiköt. Projektista on aiemmin valmistunut kaksi väliraporttia, joissa esitetään tutkimusmenetelmät ja tulokset yksityiskohdittain tarkemmin kuin loppuraportissa.

Loppuraportti sisältää kuvauksen eri maiden siltojen vedeneristysmenetelmistä ja Suomen silloilla todetusta kuplimisongelmasta, aiemmin tästä aiheesta tehtyjen koti- ja ulkomaisten tutkimusten analyysin sekä tulokset projektissa toteutetuista 13:sta erillisestä kokeellisesta tutkimuksesta tai teoreettisesta tarkastelusta.

Kuplimisen aiheuttaa eristyksen alla olevan betonikerroksen huokosissa olevan veden suuret höyrynpaineen vaihtelut. Kuplimiseen myötävaikuttaa, jos betonin pintakerroksen huokoisuus on korkea tai eristyksen tartunta on alun perin ollut heikko. Heikko tartunta on usein seuraus eristystyön kannalta huonoista sääolosuhteista, eristysalustan laatupuutteista ja eristystyövirheistä.

Tutkimuksen keskeisiä tuloksia oli, että varmin tapa kermieristysten kuplimisongelman poistamiseksi tai vähentämiseksi on tiivistää eristysalusta tiivistysepoksilla ennen aluskermin asentamista. Suomen sääoloissa eristystyön kannalta hyviä olosuhteita on vähän ja sääsuojahallin käyttö yleisesti on erittäin suositeltavaa. Kannen betonimassan ilmamäärä ei saisi ylittää SYL 3:n mukaista vaatimusta enempää kuin 3 %-yksikköä. Eristysalustan pinnan makrokarkeus ei saisi ylittää 1,5 mm. Kermiä ei tule asentaa märälle alustalle. Betonikannen kosteuden mittausten menetelmistä tulisi antaa uudet ohjeet ja joko ottaa käyttöön uusia suhteellisen kosteuden mittauslaitteita tai kehittää absoluuttisen kosteuden mittausmenetelmää paremmin työmaa-käyttöön soveltuvaksi.

Betonin jälkihoitomenetelmänä vesikastelu on eristyksen laadun kannalta parempi menetelmä kuin jälkihoitoaineen käyttö. Kansibetonin pinnasta pitäisi aina poistaa sementtiliima ja mahdollinen jälkihoitoaine hiekka- tai sinkopuhdistuksella. Ennen eristystöiden aloitusta tulisi pitää eristysalustan vastaanottotarkastus, jossa pääurakoitsija ja rakennuttaja yhdessä tarkastavat eristysalustan ennen sen luovutusta eristysurakoitsijalle. Kumibitumipadassa tulee olla sekoitin ja termostaatti. Padan lämpömittarin toimivuus tulee tarkastaa eristystöiden alkaessa.

Tutkimus tuotti tiedon keinoista kermien kuplimisongelman poistamiseksi. Ongelman ratkaisu käytännössä edellyttää nykyisten laatuvaatimusten tarkistamista ja työmenetelmien kehittämistä esitettyjen suositusten mukaan.



**KEY WORDS** bridge, waterproofing, polymer-modified bitumen, sheet membrane, concrete, moisture, temperature, blistering, rupture

## ABSTRACT

The aim of the study was to determine the causal connections for the formation of blistering on bridge deck sheet membrane waterproofings and to provide the necessary information for making modifications to documents concerning bridge construction and repair. The background for the study was the increase in sheet membrane blistering which has occurred during the 1990's since the use of protective screed was entirely replaced by air-entrained bridge concrete types.

The study was conducted from 1996-98. It was financed by the Finnish National Road Administration (Finnra) and carried out by VTT. The study produced two preliminary reports, in which the test methods and results have been presented in more detail than in the final report. The final report includes a description of bridge deck waterproofing systems and blistering problems of Finnish bridges, as well as an analysis of domestic and international studies carried out in this field and the results of 13 separate experimental or theoretical studies.

Blistering of the bridge deck sheet membrane is caused by large fluctuations of vapour pressure in the pore spaces of the concrete layer under the waterproofing. A high porosity of the top layers of the concrete deck or a weak original adhesion between the waterproofing and concrete contribute to blistering. Weak adhesions are often the result of adverse weather conditions, quality defects of the waterproofing base or faulty waterproofing workmanship.

The study makes several recommendations for the prevention of bridge deck sheet membrane blistering. The main outcome with regard to the surest means to avoid or minimize the blistering problem was the recommendation to seal the concrete bridge deck with sealing epoxy prior to the laying of the base sheet. In Finland, the use of a weather guard during waterproofing is highly recommended as the weather conditions are frequently poor. The air content of the bridge deck concrete mass should not exceed 3 % units above the Finnra requirement, and the macro texture of the concrete deck should not exceed 1.5 mm. The sheet membrane should not be applied onto a wet surface. New specifications for measurement methods of the moisture level of concrete bridge decks need to be defined. In addition, new devices for the measurement of relative moisture should be utilized, or a method of measurement for absolute moisture which is better suited to on-site usage should be developed.

From the point of view of the quality of waterproofing, watering is a better method for concrete curing than is the use of a curing agent. Cement paste should always be removed from the concrete bridge deck surface by sand blasting or shot blasting. Before waterproofing is commenced an acceptance inspection needs to be made, during which the main contractor and builder inspect the concrete bridge deck together before handing it over to the waterproofing contractor. The bitumen pot should contain a mixer and a thermostat. The study provides information about the means to avoid the blistering problem. In practice, the prerequisites for solving the problem are the revision of the current quality requirements, and the development of working methods in accordance with the proposed recommendations.

## ALKUSANAT

Tutkimuksen tavoitteena oli löytää syy-yhteydet siltojen kermieristysten kuplimisilmiön syntyyn ja tuottaa tarvittava tieto muutosten tekemiseksi sillanrakennuksen yleisiin laatuvaatimusasiakirjoihin ja siltojen korjausohjeisiin. Tutkimuksen rahoitti Tielaitoksen (TIEL) siltayksikkö. Tutkimuksen toteuttivat vuosina 1996-98 Valtion teknillisen tutkimuskeskuksen (VTT) Yhdyskuntatekniikan ja Rakennustekniikan tutkimusyksiköt.

Tutkimusta ohjasi projektiryhmä, johon kuuluivat:

Juhani Vähäaho,	TIEL, Siltayksikkö
Jouko Lämsä, pj.	TIEL, Siltayksikkö
Ossi Räsänen,	TIEL, Siltayksikkö
Pekka Lehto,	TIEL Vt1 projekti
Arto Kari,	TIEL Vt3 projekti
Seppo Rantala,	Ins.tsto Seppo Rantala Oy
Jaakko Hoikkala,	Lemminkäinen Oy
Ari Kompuinen,	Katepal Oy
Juhani Helmijoki,	Kattoliitto ry.
Maarit Järvinen,	Finnsementti Oy
Erkki Vesikari,	VTT Rakennustekniikka
Kyösti Laukkanen, siht.	VTT Yhdyskuntatekniikka

Siltayksikössä tutkimusta valvoi dipl.ins. Jouko Lämsä. VTT:ssä tutkimuksen projektipäällikkö oli dipl.ins. Kyösti Laukkanen.

Projektista on aiemmin valmistunut kaksi väliraporttia, [1], [2]. Loppuraportin ovat laatineet seuraavat henkilöt:

dipl.ins. Kyösti Laukkanen,	VTT Yhdyskuntatekniikka
dipl.ins. Erkki Vesikari,	VTT Rakennustekniikka
dipl.ins. Pertti Pitkänen,	VTT Rakennustekniikka
fil.kand. Hemming Paroll,	VTT Rakennustekniikka.

Projektin VTT:ssä toteuttaneeseen työryhmään kuuluivat loppuraportin kirjoittajien lisäksi dipl.ins. Taru Haimala ja fil.kand. Paula Raivio VTT Rakennustekniikasta.

Helsinki, marraskuu 1998

Tielaitos, siltayksikkö



## SISÄLTÖ

1	JOHDANTO	9
1.1	Yleistä	9
1.2	Tavoite	9
1.3	Tutkimuksen tausta	9
2	ESISELVITYS	10
2.1	Eristyskäytäntö eri maissa	10
2.1.1	Yleistä	10
2.1.2	Eristysmateriaalit	10
2.1.3	Eristysolosuhdevaatimukset	11
2.2	Eristyksen kuplimishavaintoja siltatyömailla	13
2.2.1	Yleistä	13
2.2.2	Aineisto	13
2.2.3	Tulokset	13
2.3	Aiempia tutkimuksia	18
3	KOKEELLISET JA TEOREETTISET TUTKIMUKSET	29
3.1	Lämpötila- ja kosteustutkimukset	29
3.1.1	Yleistä	29
3.1.2	Aineisto ja tutkimusmenetelmät	29
3.1.2.1	Teoreettiset laskelmat	29
3.1.2.2	Kosteus- ja lämpötilamittaukset siltarakenteessa	30
3.1.2.3	Betonin kuivumisnopeus	32
3.1.2.4	Eristysolosuhteet	33
3.1.3	Tulokset	34
3.1.3.1	Teoreettiset laskelmat	34
3.1.3.2	Kosteus- ja lämpötilamittaukset silloilla	43
3.1.3.3	Betonin kuivumisnopeus	50
3.1.3.4	Eristysolosuhteet	51
3.2	Työmenetelmätutkimukset	56
3.2.1	Yleistä	56
3.2.2	Aineisto ja tutkimusmenetelmät	56
3.2.2.1	Eristysalustan jälkihoito ja pinnan puhdistus	56
3.2.2.2	Sääsuojahallitutkimus	56
3.2.2.3	Betonipinnan kuivaaminen	57
3.2.2.4	Kermien asennusmenetelmätutkimus	59
3.2.3	Tulokset	62
3.2.3.1	Eristysalustan jälkihoito ja pinnan puhdistus	62
3.2.3.2	Sääsuojahallitutkimus	62
3.2.3.3	Betonipinnan kuivausmenetelmät	66
3.2.3.4	Kermien asennusmenetelmätutkimus	68
3.3	Eristyksen vauriot ja laatu	69
3.3.1	Yleistä	69
3.3.2	Aineisto ja tutkimusmenetelmät	69

---

3.3.2.1	Kermien kuplimisen kokeellinen simulointi	68
3.3.2.2	Vauriotutkimukset	71
3.3.2.3	Kansibetonin huokoisuusvaihtelut syvyysuunnassa	72
3.3.2.4	Eristysalustan pinnan karkeus	72
3.3.2.5	Kumibitumin laatututkimus	73
3.3.3	Tulokset	73
3.3.3.1	Kermien kuplimisen kokeellinen simulointi	73
3.3.3.2	Kuplimisvauriokohteiden betonitutkimukset	77
3.3.3.3	Kuplien sisältämän kaasun koostumus	77
3.3.3.4	Kuplimisen mahdollisia syitä vauriokohteissa	78
3.3.3.5	Kansibetonin huokoisuusvaihtelut pystysuunnassa	80
3.3.3.6	Eristysalustan pinnan karkeus	80
3.3.3.7	Kumibitumin laatu	82
4	YHTEENVETO	84
4.1	Yleistä	84
4.2	Esiselvityksen yhteenveto	84
4.3	Lämpötila ja kosteustutkimusten yhteenveto	85
4.4	Työmenetelmätutkimusten yhteenveto	88
4.5	Vaurio- ja laatututkimusten yhteenveto	90
5	JOHTOPÄÄTÖKSET	91
6	KIRJALLISUUSVIITTEET	93

---



## **1 JOHDANTO**

### **1.1 Yleistä**

Siltojen teräsbetonikannet suojataan vedeneristyksellä mm. kosteuden ja liukaudentorjuntasuolojen haitallista vaikutusta vastaan. Yleisimmin Suomessa käytetty siltakansien vedeneristysrakenne muodostuu kahdesta päällekkäisestä kumibitumikermistä. Kermieristysten pysymisessä kiinni alustassa on todettu ongelmia, jotka ovat johtaneet kalliisiin korjauksiin.

### **1.2 Tavoite**

Siltojen kermieristysten kuplimisilmiöiden selvitystutkimuksen tavoite oli löytää syy-yhteydet kermieristysten kuplimisilmiön syntyyn ja tuottaa tarvittava tieto muutosten tekemiseksi siltojen rakentamis- ja korjausasiakirjoihin.

### **1.3 Tutkimuksen tausta**

Siltakansien vedeneristysten kupliminen on muodostunut suureksi ongelmaksi siltojen kermieristystöissä 1990-luvulla. Kupla nostaa myös asfaltin ylös, jolloin päällyste halkeilee ja purkaantuu liikenteen alla hyvin nopeasti. Aiemmin tehtiin eristyksen päälle 50 mm paksu suojabetonilaatta, joka esti kuplimisen betonin kovettumisen jälkeen. 1980-luvun lopulla sillan kannen betonin koostumusta muutettiin, kun siirryttiin kauttaaltaan huokostetun massan käyttöön ja nostettiin betonin säilyvyysvaatimuksia.

Pitkillä hellejaksoilla saattaa kermieristyksen alle muodostua niin suuri kaasunpaine, että koko pintarakenne nousee kuplille. Kupla saattaa sopivissa sääolosuhteissa syntyä heti aluskermin asennuksen jälkeen, pintakermiä asennettaessa, päällysteen levityksen tai jyräyksen aikana tai muutaman vuoden kuluttua. Sillalla voi esiintyä vain yksi kupla tai kuplia voi olla runsaasti koko kansilaatan alueella. Kuplien syntymiseen voivat vaikuttaa sääolosuhteiden lisäksi betonin koostumus ja kosteus, eristysalustan pinnan puhtaus ja karkeus, eristysmateriaalien laatuero ja työvirheet.

Yleensä muista kuin karkeista työvirheistä johtuvia syitä ei voida jälkikäteen todistaa kuplimisen aiheuttajaksi, koska esim. työn aikaisista olosuhteista tai alustan ja materiaalien käsittelystä ei ole riittävästi tietoa. Myös puhtaasti materiaali-tekni-  
stisten syiden vaikutuksesta kuplien muodostumiseen puuttuu riittävä tutkimustieto. Kuplien rikkoutuessa altistuu siltakannen raudoitus ja betoni suolavesien haitallisille vaikutuksille. Siksi kuplat on aina korjattava korvaamalla vaurioitunut eristyskohta uudella. Kupliminen on massiivisten laatta- ja palkkisiltojen ongelma. Sen sijaan oikein tehty mastiksieristys ei nouse kuplille, koska eristyksen alle syntyvät paineet pääsevät purkautumaan paineentasausputkien kautta. Tielaitoksen siltayksikkö käynnisti kuplimisongelmien poistamiseksi siltojen kermieristysten kuplimisilmiöiden selvitystutkimuksen, joka toteutettiin vuosina 1996 - 98. VTT:ssä ohjelman toteutukseen osallistuivat Yhdyskuntatekniikan sekä Rakennustekniikan tutkimusyksiköt. Projektista on aiemmin julkaistu kaksi väliraporttia, jotka sisältävät vuosien 1996 - 97 tutkimustulokset, [1], [2].

## 2 ESISELVITYS

### 2.1 Eristyskäytäntö eri maissa

#### 2.1.1 Yleistä

Useimmissa Euroopan maissa siltakannet suojataan vedeneristyksellä pintave-sien haitallisilta vaikutuksilta. Eroja eri maiden välillä löytyy kuitenkin sekä eris-tysten suunnittelussa, materiaalivaatimuksissa että testausmenetelmissä. Usein nämä erot perustuvat erilaisiin ilmasto-olosuhteisiin, mutta suurelta osin taustalla ovat myös aiemmat kokemukset, taloudelliset näkökohdat ja erilaiset suunnitte-lufilosofiat.

#### 2.1.2 Eristysmateriaalit

Polymeerimodifioidut kermiit ovat yleinen eristysmateriaali Euroopassa. Yhdek-sän Euroopan maan vertailussa suurimmalla osalla enemmistö silloista on eris-tetty kumibitumikermeillä. Itävallassa ja Suomessa niiden osuus on todennäköi-sesti suurin ( 90 ja 80 %), mutta myös Ranskassa, Saksassa, Ruotsissa ja Sveitsissä niiden osuus on huomattava.

Skandinavian maissa yleisesti käytetyt kermiit ovat SBS-modifioituja tuotteita, kun taas muissa Euroopan maissa käytetään sekä SBS- että APP-kermejä. Tanskassa käytetyistä kermeistä 90 % sisältää sideaineena puhallettua bitumia. Sielläkin SBS-kermien osuus kasvaa kuitenkin nopeasti. Englannissa silloilla on yleisesti käytössä polyuretaani-, epoksi- tai akryylipohjainen massaeristys. Saksa käyttää huomattavassa laajuudessa myös polyuretaanieristystä betoni-kantisilla silloilla. Yhteenveto eri maissa käytetyistä vedeneristysrakenteista on taulukossa 1.

Eristysalustan tartunta-aineena käytetään tavallisesti bitumiliuosta (polymeroi-tua tai polymeroimatonta, tartukkeen kanssa tai ilman) Itävallassa, Ranskassa, Sveitsissä ja Ruotsissa. Saksassa ja Itävallassa käytetään suuressa määrin epoksitiivistystä kermieristuksen pohjustuksena, [4]. Suomessa tartunta-aine on yleensä polymeerimodifioitu bitumiliuos (kumibitumiliuos KBL), mutta sen ase-masta on hyväksytty myös eristysalustan kaksinkertainen epoksitiivistys.

Jos Saksassa asennetaan aluskermi liimaamalla epoksitiivistyksen päälle, tulee käyttää lisäksi bitumipohjaista tartunta-ainetta. Hitsauskiinnitys epoksille ei edel-lytä tartunta-aineen käyttöä, [5]. Tanskassa yleisimmät tartunta-ainetyypit ovat kloorikautsu- tai akryylipohjaisia, [6].



Taulukko 1. Eristysrakenteita Euroopan eri maissa, [4].

Maa	Eristysrakenne				
	Kermieristys		Mastiksieristys		Massa- eristys
	polymeeri- modifioitu	modifioi- maton	polymeeri-modifioitu	modifioimaton	
Itävalta	SBS, APP 2-kerrosta 90 %	8 - 9 %	< 1 %		1 %
Tanska	SBS 1 - 2 kerr.	1 - 3 kerr 90 %	Ei	Ei	
Ranska	SBS, APP 65 %	B3A	SBS käytössä		Polyuretaani Epoksi <10%
Saksa	SBS, APP 1 - 2 kerr.	tyyppi B3A 1 kerros	Ei		Polyuretaani
	epoksitiivistys 100 %				
Englanti	SBS, APP käytetään	käytetään	käytetään		Polyuretaani Epoksi Akryyli
Norja	SBS 1 –2 kerr.	ei enää käytössä	SBS Mastiksi 12 mm epoksin päällä ei paineentas.		Polyuretaani (vähän)
Ruotsi	SBS 1 - 2 kerr.	ei enää käytössä	Mastiksi 10 mm (alla paineentas. kermi)	Mastiksi 10 mm (alla aineentas. kermi)	-
Sveitsi	SBS, APP 1 kerros < 60 %	1 - 2 kerrosta (käytössä)	Mastiksi 10 mm (alla paineentas. kermi, irrallinen rakenne)	Pehmeä mastiksi 1- 2 kerr. (alla paineentas. kermi )	Polyuretaani erityistapauksissa
Suomi	SBS 1 - 2 kerr. 80 %	ei enää käytössä	SBS min 14 mm 1 - 2 kerr. 18 %		Polyuretaani 2 %

B3A = metallipintainen bitumikermi + valuasfaltti 30 mm

SBS = styreeni-butadieeni-styreeni

APP = ataktinen polypropyleeni.

### 2.1.3 Eristysolosuhdevaatimukset

Tielaitoksen ohjeiden [3] mukaan siltakannen saa eristää, kun jälkihoidon päättymisestä on kulunut kolme viikkoa, ellei betonin kosteutta todeta mittauksin. Kolme viikkoa jälkihoidon päättymisestä vastaa likimäärin neljää viikkoa betonoinnin päättymisestä. Kansibetonin kosteudelle on annettu taulukon 2 mukaiset vaatimukset. Vuonna 1998 ei betonin suhteellista kosteutta edellytetty

mitattavaksi, koska käytössä olleen porareikämenetelmän tilalle oli tulossa uusia mittaussuomenetelmiä.

*Taulukko 2. Siltakannen kosteusvaatimukset eristystöiden aikana, [3].*

Eristysmateriaali	Suhteellinen kosteus m-%	Absoluuttinen kosteus m-%
Mastiksieristys ja paineentasauskermirakenne	≤ 95	≤ 5,5
Muut eristykset	≤ 92	≤ 4,5

Eristysolosuhteita koskevat vaatimukset vaihtelevat jonkin verran eri maissa, taulukko 3. Useissa maissa on määrätty eristysalustalle alin eristystyön aikainen pintalämpötila, joka vaihtelee Sveitsin 0 °C:sta Norjan +10 °C:een (Suomi +5 °C). Lisäksi joillakin mailla on vaatimus, että eristysalustan lämpötilan tulee olla vähintään 3 °C ilman kastepistelämpötilan yläpuolella. Ilman suurin sallittu kosteus saa olla yleensä noin 75 % (Suomi 85 %, Ranska 95 %), [4], [7].

Ruotsin siltanormeissa [8] ei esitetä numeerisia vaatimuksia betonin kosteudelle. Kermieristystyön saa aloittaa, kun betonoinnista on kulunut 21 vuorokautta, jos betonin pinta on kuiva. Saksassa asetetaan sääolosuhdevaatimukset ensi sijaisesti epoksiöille, koska epoksiöivistys on tavanomainen kermin alustan käsittelytapa. Suomessa hyväksytyn epoksiöivistysmateriaalin käyttöohjeisiin on otettu samat vaatimukset eristysolosuhteille kuin Saksassa.

SYL 6:ssa ei ole lukuarvoina annettu vaatimuksia eristysalustan pinnan karkeudelle. Saksassa [5] ja Ranskassa [9] on makrokarkeusvaatimukset:

- Ranska: makrokarkeus keskimääräinen ≤ 1,5 mm, hyvä ≤ 1,0 mm
- Saksan siltanormeissa on alustan pinnan karkeudelle vaatimukset:
  - enintään 1,5 mm, kun aluskermi kiinnitetään hitsaamalla
  - enintään 2,0 mm, kun aluskermi kiinnitetään liimaamalla.

Saksan normin mukaisen suurimman sallitun karkeuden vaatimuksen taustalla on tutkimustulos, jonka mukaan suurempi karkeus lisää eristuksen kuplimisriskiä, [10].

*Taulukko 3. Eristysolosuhteille asetettuja sääolosuhdevaatimuksia eri mais-  
sa,[3], [4], [5], [8], [9].*

	Suomi	Ruotsi	Norja	Saksa		Ranska
				eristys	epoksi	
Ilman lämpötila (°C)		≥ 5	≥ 5	≥ 5	8...40	
Ilman kosteus (%RH)	≤ 85	-		-	≤ 75	≤ 95
Pintalämpötila (°C)	≥ 0 <sup>1)</sup> ≥ 5 <sup>2)</sup>		≥ 10			≥ 5
Pintalämpötila yli kastepisteen (°C)	≥ 3	-		-	≥ 3	

1) mastiksieristys

2) kermieristys

## 2.2 Eristyksen kuplimishavaintoja siltatyömailla

### 2.2.1 Yleistä

Siltatyömailla on paras käytännön tietämys kuplimisongelmien esiintymisestä. Tämä tietämys pyrittiin hyödyntämään kyselytutkimuksen avulla. Ongelmana työmaatiedon keräämisessä on, että vauriot korjataan yleensä mahdollisimman pian eikä niitä dokumentoida systemaattisesti.

### 2.2.2 Aineisto

Tielaitoksen siltayksikkö teki vuonna 1995 kyselyn siltatyömaille kuplimisvaurioiden laajuuden ja syiden selvittämiseksi. Vastauksiin sisältyi tietoa 46 sillalta. Kohdassa 2.2.3 esitetyt tulokset on saatu tämän kyselyn perusteella eivätkä ne siten sisällä kuplimishavaintoja vuoden 1995 jälkeen.

Yleensä vastauksissa käsiteltiin siltoja, joiden eristys oli kuplinut (32 kpl). Kuplimattomien siltojen kohdalla vastausprosentti oli olennaisesti alhaisempi kuin kuplineilla, koska useat tiepiirit ovat raportoineet vain ongelmakohteiden tuloksia. Tästä syystä tutkimusaineistosta ei käy selville yksittäisten tuotemerkkien tai urakoitsijoiden markkinaosuutta eikä seuraavassa siksi esitetä myöskään johtopäätöksiä nimeltä mainiten eri tuotemerkkien tai urakoitsijoiden mahdollisista vaikutuksista eristysvaurioiden syntymiseen.

### 2.2.3 Tulokset

#### Betonityöt ja -materiaalit

Huokostinta ja jälkihoitoainetta oli käytetty useimmilla silloilla sekä kuplineiden ja kuplimattomien eristysten ryhmässä. Muuta lisäainetta (esim. notkistinta) oli käytetty noin joka toisella kuplineella sillalla, taulukko 4.



Taulukko 4. Betonin lisäaineiden ja jälkihoitoaineen käyttö tutkimussilloilla.

	KERMI KUPLI		EI KUPLIA	
	Materiaali käytössä			
	Kyllä	Ei	Kyllä	Ei
	SILTOJEN LUKUMÄÄRÄ [kpl]			
Huokostin	29	3	11	3
Muu lisäaine	15	17	11	3
Jälkihoitoaine	24	8	10	4

Silloilla, joiden eristys oli kuplinut, oli käytetty betonitöissä eri tuotemerkkejä

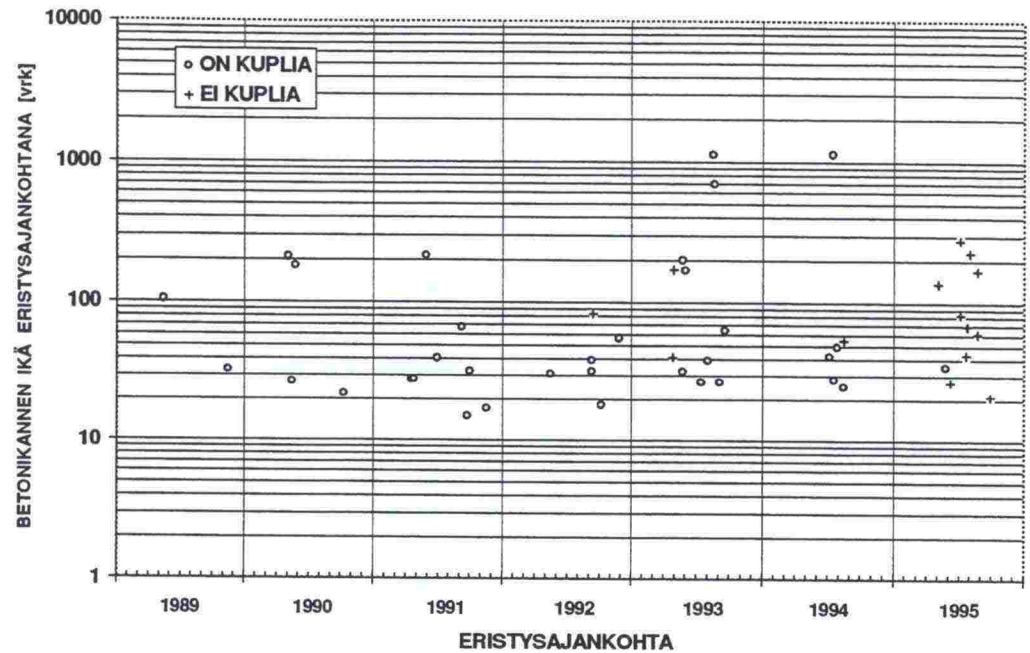
- 5 eri huokostinta
- 7 muuta lisäainetta
- 3 jälkihoitoainetta (lisäksi vesijälkihoito).

#### Eristysalusta

Kaikista kuplineista silloista noin 40 %:lla oli betonin kosteus mitattu. Silloilla, joille kuplia ei ilmaantunut, oli kosteus mitattu noin joka toisella sillalla. Kastepistettä ei oltu mitattu yhdelläkään sillalla.

Betonikannen ikä oli alle SYL:n edellyttämän (3 viikkoa jälkihoidon päättymisestä  $\approx$  4 viikkoa betonoinnista) kuudella kuplineella ja kahdella kuplimattomalla sillalla. Kolmella iältään alle 4 viikon ikäisellä kuplineella sillalla mitattiin betonin kosteudet, jotka olivat RH 91, RH 92 ja RH 97 %. Nämä kosteudet ylittivät tuolloin voimassa olleen SYL:in suurimman sallitun kosteuden. Toisella alle 4 viikon ikäisellä, mutta kuplimatta jääneellä sillalla mitattu betonin absoluuttinen kosteus (4,3 m-%) täytti vaatimuksen.

Eristysalusta oli hiekkapuhallettu alle puolessa kuplineista silloista ja kaikilla silloilla, joilla kuplia ei esiintynyt lainkaan. Kuplineilla silloilla oli erityisen harvinaista (noin yhdellä sillalla viidestä), että samalla sillalla oli sekä mitattu betonin kosteus että hiekkapuhallettu eristysalusta, taulukko 5.



Kuva 1. Kuplineiden ja kuplimattomien eristysten asennusajankohta ja betonikannen ikä (havainnot tehty v. 1989-95).

#### Eristystyöt, -materiaalit ja kupliminen

Kyselyyn sisältyneet sillat oli eristetty v. 1989-95, eniten kuplimista todettiin vuonna 1993 valmistuneissa eristyksissä (8:lla sillalla). Seuraavana vuonna valmistuneiden eristysten kupliminen aleni puoleen edellisestä. Kuvassa 1 on esitetty myös havaintoja eristyksistä, jotka eivät olleet kuplineet v. 1995 loppuun mennessä. Nämä oli lähes kaikki tehty vuonna 1995. Vuoden 1997 hellekesänä kuplivat kuitenkin runsaasti myös v. 1995-96 asennetut kermi.

Kuplineita eristyskiä oli tehnyt 11 eristysurakoitsijaa käyttäen eri materiaalin valmistajien tuotemerkkejä seuraavasti:

- 4 kumibitumia
- 5 kumibitumialuskermiä.

Kuplineissa kohteissa aluskerman yleisin kiinnitystapa (63 %) oli liimaus kumibitumilla betonialustaan, joka oli pohjustettu kumibitumiliuoksella. Liimaus oli tutkuskohdeiden eristysaikana TIEL:n suosittama menetelmä aluskerman kiinnitykseen. Erilaisten eristysmateriaalien vaikutusta kuplimiseen ei voida näiden tulosten perusteella luotettavasti todeta, koska tiedot saatiin vain pieneltä osalta kuplimatta jääneistä eristyksistä, taulukko 5.

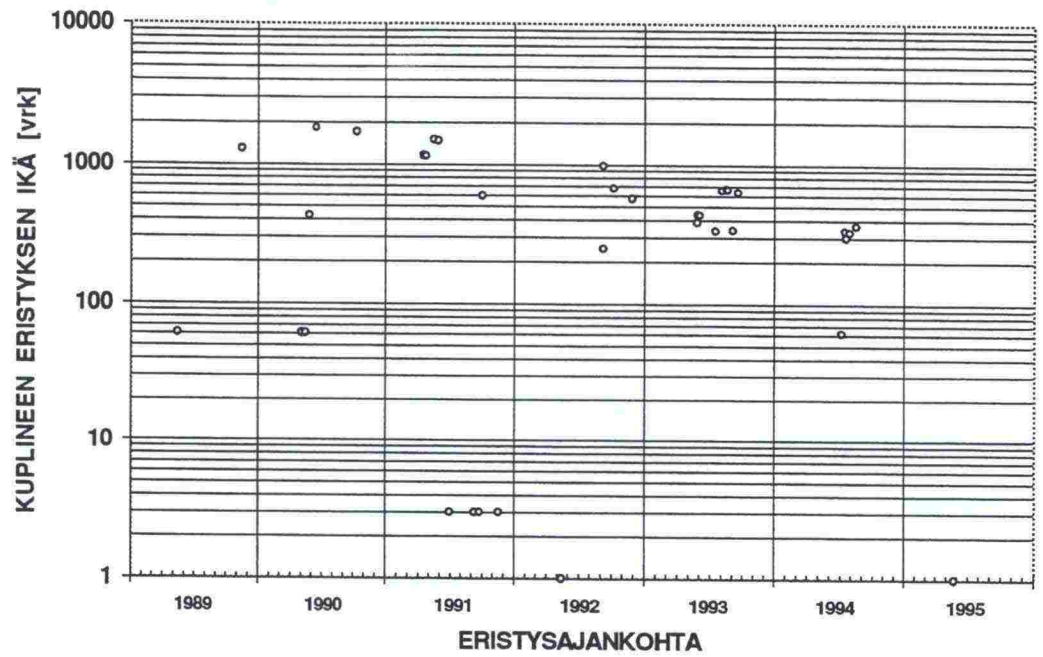
Taulukko 5. Eristysalusta ja eristysten kiinnitystapa tutkimussilloilla.

	KERMI KUPLI		EI KUPLIA	
	Materiaali tai menetelmä käytössä			
	Kyllä	Ei	Kyllä	Ei
	SILTOJEN LUKUMÄÄRÄ [kpl]			
Eristysalusta				
Kosteuden mittaus	9	23	6	8
Hiekkapuhallus	15	17	14	0
Kosteuden mittaus ja hiekkapuhallus samalla sillalla	6	26	6	8
Primer ja kiinnitystapa				
KBL + liim.	21		9	
KBL + hits.	5		3	
2-kert. epoksi + liim.	3		2	
2-kert.epoksi + hits.	1		1	
1-kert.epoksi + hits.	1		0	
ei ilmoitettu	2		0	

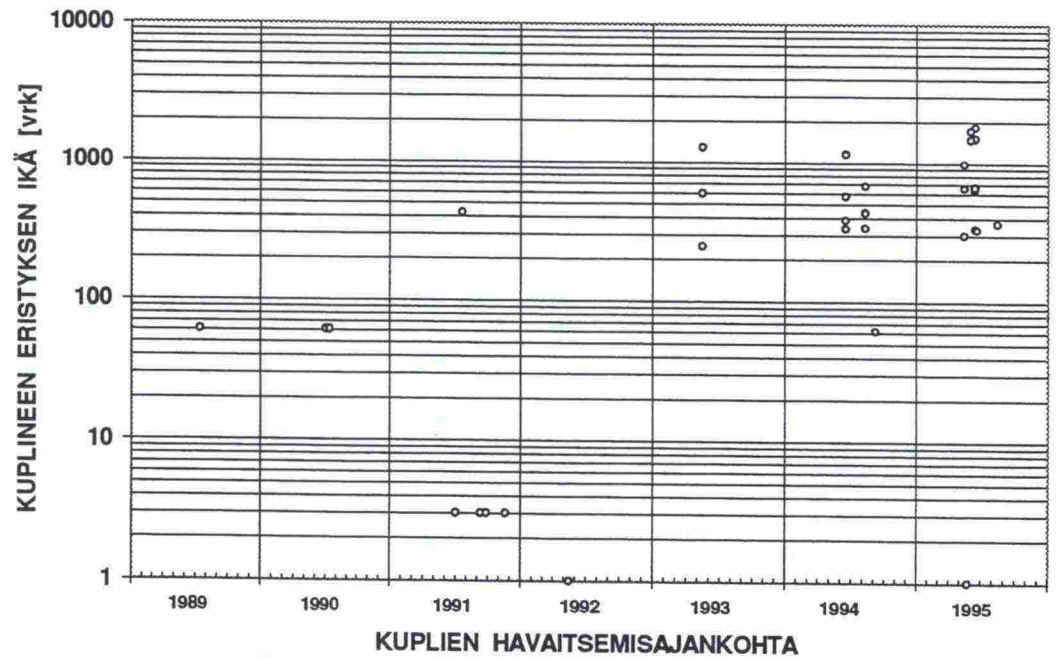
Kuvasta 2 voidaan todeta kuplineiden eristysten ikä ja valmistumisajankohta. Suurin osa kuplineista eristyksistä oli yli vuoden ikäisiä.

Kuvan 3 mukaan kuplat havaittiin enimmäkseen vuosina 1994-95. Aiempina vuosina on osa kuplista saattanut jäädä kirjaamatta muistiin, koska asiaan alettiin kiinnittää enemmän huomiota ongelman laajentuessa. Vuonna 1996 ei kermirakenteissa todettu merkittävästi kuplimista.





Kuva 2. Eristysajankohta ja kuplineen eristyksen ikä.



Kuva 3. Kuplien havaitsemisajankohta ja eristyksen ikä.

## 2.3 Aiempia tutkimuksia

### Eristysalustan kosteuden mittaus

Suomen silloilla tehty kannen betonin kosteusmittaukset perustuvat yleensä joko betonissa olevan ilman suhteellisen kosteuden tai betonin vesipitoisuuden mittaamiseen. Viimeisten kymmenen vuoden aikana yleisin menetelmä on ollut määrittää kannen kosteus suhteellisen kosteuden mittausmenetelmällä, jossa mitataan betonin kosteus noin 50 mm syvyisen mittausreiän sisältämän ilman kosteuden avulla. Absoluuttinen kosteus määritetään yleensä kuivaamalla betoninäyte 105 °C:ssa.

Molempien kosteudenmittausmenetelmien haittoina on, että tulosta ei saada selville heti tultaessa mittauspaikalle. Mittausmenetelmät edellyttävät erityistä tarkkuutta ja ovat ainetta rikkovia. Siltatyömaiden mittauslaitetutkimuksessa vertailtiin Suomessa vuonna 1993 saatavissa olleita betonin kosteuden mittauslaitteita, mutta yksinkertaista, nopeaa ja samalla luotettavaa menetelmää, joka olisi korvannut aiemmat menetelmät, ei tuolloin löytynyt. Myös muutamia sähkönjohtavuuden mittaamiseen perustuvia laitteita kokeiltiin, mutta niillä ei pystytty mittaamaan luotettavasti betonin kosteutta, [11].

USA:ssa mitattiin vuonna 1987 jatkuvatoimisilla mittareilla, jotka olivat Peltier-tyyppisiä psykrometrejä, siltakannen betonin kosteutta syvyyksiltä 10, 40, 75 ja 110-140 mm. Kannesta oli instrumentoitu sekä negatiivisen että positiivisen momentin alueita. Kyllästysaste oli raudoituksen syvyydellä noin 90 %. Kosteuden vaihtelut olivat negatiivisen momentin alueella suurempia kuin positiivisen momentin alueella ehkä johtuen negatiivisen alueen suuremmasta vetohalkeamien määrästä. Erityisen tärkeänä mittauksen luotettavuuden varmistamiseksi pidettiin anturien kalibrointia, [12]. Viime vuosina on myös Suomen markkinoille tullut uusia jatkuvatoimisia betoniin upotettavia kosteudenmittausantureita, joita on käytetty vuoden 1995 syksystä lähtien myös siltakansien kosteustutkimuksissa, ks. kohta 3.1.2.2.

Englannissa käytetään sähkönjohtavuuteen perustuvia mittauslaitteita. Ongelmana näissä menetelmissä on mm. hyvän kosketuksen saaminen betonipinnan ja mittauspiikin välille sekä betoniraudituksen aiheuttama häiriö betonin sähkönjohtavuusmittauksiin, [6].

Saksassa kosteuden mittaukseen käytetään normien mukaan kalsium-karbidimenetelmää, jota Suomessa pidetään epäluotettavana. Toinen käytetty menetelmä perustuu sähkönvastuksen mittaukseen.

Vuosina 1992-93 mitattiin VTT:n eristystutkimusten yhteydessä siltakannen betonin kosteuksia ennen eristystöiden aloitusta. Suhteelliset kosteudet mitattiin 50 mm syvyisistä porareijistä ja tuloksena on ilmoitettu siltakannen eri kohtien keskimääräiset kosteudet ennen eristystä. Useimmilla silloilla betonin suhteellinen kosteus täytti nykyiset vaatimukset. Absoluuttisen kosteuden vaatimusta ne eivät yleensä täyttäneet.

VTT teki vuonna 1992 mittavan siltojen mikroilmastotutkimuksen, jonka avulla pyrittiin keräämään mahdollisimman kattavasti ja luotettavasti perustiedot sillan



eri osien lämpötilojen ja suhteellisten kosteuksien vaihtelusta pääosin syksystä loppukevääseen. Betonin suhteellinen kosteus mitattiin betoniin poratusta reiästä Vaisalan kosteusantureilla. Reunapalkin yläpinnan korjattu kosteus 20 mm syvyydellä vaihteli mittausaikana (18.10.91-4.6.92) välillä RH 93-98 %, [13].

#### Betonin kuivuminen

Betonin ominaisuuksilla, ympäristöolosuhteilla ja rakenneratkaisuilla on merkittävä vaikutus betonin kuivumisnopeuteen. Hyvissä olosuhteissa nopeimmat lattia-betonit kuivuvat 90 %:n suhteelliseen kosteuspitoisuuteen jopa viikossa, kun taas vaikeimmissa olosuhteissa betonirakenteen kuivuminen saattaa kestää jopa vuoden, [14].

Betonilaatan (esim. siltakannen) kuivumisaika riippuu laatan paksuudesta. Laatan paksuuden kaksinkertaistuessa tai jos laatta kuivuu vain yhteen suuntaan, kasvaa kuivumisaika vakio-olosuhteissa nelinkertaiseksi. Esim. liittolevy-laatoissa teräspoimulevy estää kosteuden haihtumisen toiseen suuntaan täysin ja siltakannen kuivumisen kannalta se on siten epäedullinen ratkaisu.

Olosuhteilla on suuri vaikutus betonin kuivumiseen. Ympäristön lämpötila, kosteus ja ilmavirrat vaikuttavat siihen, miten nopeasti betonirakenteen pinnalla oleva kosteus haihtuu ja rakenteen sisällä oleva kosteus siirtyy pintaan. Ulkona olevissa rakenteissa kuivumista hidastavat sade ja kaste, tuulinen ja aurinkoinen sää taas nopeuttaa kuivumista. Niin kauan kuin siltakannen betoni on sateisissa olosuhteissa, haihtumiskuivumista kannen yläpinnasta ei tapahdu. Betoniin päässyt lisävesi, kuten sadevesi ja kastelu, hidastaa rakenteen kuivumista huomattavasti. Mitä myöhemmässä vaiheessa betoniin pääsee lisävettä, sitä hitaammin se poistuu.

Ilman suhteellinen kosteus on riippuvainen lämpötilasta. Lämpötilan noustessa suhteellinen kosteus pienenee, jos vesihöyrymäärä pysyy vakiona. Tällöin betonin ympäröivän ilman kyky vastaanottaa betonista haihtuvaa kosteutta kasvaa. Ilman lämpötilan nostaminen 10 °C vaikuttaa jo merkittävästi kuivumiseen. Ympäristön lämpötilan noustessa myös betonirakenteen lämpötila nousee, jolloin betonin kosteuden siirtokyky kasvaa. Viileänä vuodenaikana tai sateisena kesänä siltakannen kuivumisolosuhteet saadaan helposti hyviksi lämmitetyn ja riittävästi tuuletetun sääsuojan avulla.

Betonin suhteitus ja jälkihoito vaikuttavat siihen, miten paljon ja miten nopeasti betonista haihtuu kosteutta ennen eristysolosuhdevaatimusten saavuttamista. Haihtumisnopeuteen vaikuttaa lähinnä betonin huokosrakenne.



### Betonin kuivumisen nopeuttaminen

Alhainen vesisideainesuhte hidastaa haihtumiskuivumista. Tällaisessa betonissa on kuitenkin joko huomattavasti korkeampi sementtimäärä tai alhaisempi seosvesimäärä, jolloin haihdutettavaksi jäävän vapaan veden määrä jää hyvin alhaiseksi. Riittävän alhaisella vesisideainesuhteella ( $w/b \leq 0,40$ ) sitoutumiskuivumisen osuus on niin suuri, että betonin suhteellinen kosteuspitoisuus laskee 90 %:iin ilman veden haihtumista. Tätä alhaisempien kosteuspitoisuuksien nopea saavuttaminen sitoutumiskuivumisen ansiosta on mahdollista lisäaineiden avulla, [14]. Alhaisen vesisideainesuhteen omaavalla betonilla on mahdollista saavuttaa siten SYL:in edellyttämät eristysalustan kosteusvaatimukset ilman betonin haihtumiskuivumista, jos ulkopuolisen veden imeytyminen betoniin estetään.

Talonrakennuksessa käytetään jonkin verran nopeasti kuivuvia betoneita, jotka kuivuvat 2-10 kertaa niin nopeasti kuin tavanomainen betoni, [14]. Nopeasti kuivuvilla betoneilla rakenteen paksuus ja kuivumisolosuhteet eivät vaikuta kuivumisnopeuteen yhtä paljon kuin tavanomaisissa betoneissa. Ns. itsestään kuivuvat betonit kuivuvat hyvissä olosuhteissa sisältä jopa vesisäilytyksessä. Alhaisen lämpötila hidastaa kuivumista kuitenkin merkittävästi.

Betonin kuivumisen nopeuttamiseksi voidaan käyttää useita menetelmiä:

- ympäröivän ilman lämmittäminen (esim. kuumailmapuhaltimella) ja tuuletaminen
- betonin pinnan lämmittäminen (esim. säteilylämmittimillä)
- kansilaatan pintaosan lämmittäminen sähkölämmityslangoilla
- kosteuden poiston tehostaminen ns. kosteuden kerääjillä
- pinnassa olevan tiiviin sementtiliiman poisto hiekkapuhalluksella varhaisessa vaiheessa
- imubetonointi, jossa kosteutta imetään vastavaletun betonin pinnasta imumattojen avulla, [14].

Lämmittämisellä on todettu olevan työmaalla mm. seuraavia etuja:

- rakenteet ja työtilat kuivuvat ja kuivumisajat lyhenevät
- työn laatu paranee
- työ tulee mahdolliseksi ääriolosuhteissa
- säästä johtuvia odotusaikoja ei tule
- rakentamisaika lyhenee ja työteho kasvaa.

Lämmitys on suunniteltava aina yhdessä suojausten ja kosteuden poiston kanssa. Tarkoituksenmukaiseen lämmittämiseen liittyy aina jonkin asteinen suojaus (esim. sääsuoja). Lämmitysmenetelmän valintaan vaikuttavat mm. tehon tarve ja saatavilla oleva energia, [15].

Betonin kuivatustarkoitukseen sääsuojissa käytettävät laitteet voivat olla öljy-, sähkö- tai nestekaasukäyttöisiä. Lämpösäteilijöillä pystytään lämmitys kohdistamaan tehokkaasti kuivattavaan pintaan, kunhan säteilijöitä on riittävä määrä. Jos käytetään kuumailmalämmitystä, on lämmitin tarkoituksenmukaista sijoittaa sääsuojan ulkopuolelle siten, että se puhalttaa lämmitettyä ulkoilmaa sisään ja kostea sisäilma poistetaan sääsuojan toisesta päästä ulos. Jos käytetään ilmankuivaajia, tulee sääsuojan olla hyvin suljettu ja riittävästi lämmitetty. Vas-

tuslankalämmitys ei tule kysymykseen laajapintaisen rakenteen lämmittämises-  
sä, [16].

Halvempi vaihtoehto lämmitettävälle sääsuojahallille on tehokkaasti tuulettuva,  
esim. päistään osittain avoin, lämmitämätön sadekatos, jolla pystytään estä-  
mään sadeveden ja kasteen pääsy siltakannelle.

#### Huokostimet

Saksassa käytetään huokostusainetta Saksan liikenneministeriön kirjeen [17]  
mukaan silloilla vain reunapalkeissa ja betoniseinämissä. Korkean pakkaskestä-  
vyyden omaava betoni valmistetaan standardin DIN 1045 kohdan 6.5.7.3 mukai-  
sesti, [18]. Sen mukaan betonin täytyy olla pakkasen kestävä, jos se on  
jatkuvasti läpimärkä ja alttiina jäätymissulamsvaihteluille. Pakkasenkestävän  
betonin vesisideainesuhde ei saa ylittää arvoa 0,60. Massiivisissa rakenteissa  
se voi nousta arvoon 0,70, jos käytetään huokostusaineita. Huokostuksen  
määrä riippuu betonin maksimiraekoosta: jos maksimiraekoko on 16 mm, tulee  
betonimassan keskimääräisen ilmapitoisuuden välittömästi ennen betonointia  
olla vähintään  $\geq 4,5 \%$  ja maksimiraekoolla 32 mm on vastaava arvo  $\geq 4,0 \%$ .  
Yksittäiset arvot saavat alittaa keskiarvovaatimuksen enintään 0,5 %-yksikköä.

Suomessa siltabetonin pakkasenkestävyysvaatimus esitetään suunnitelmissa  
pakkasenkestävyysluvun P avulla. Rakenteet jaotellaan pakkasenkestävyys-  
luokkiin P20, P30, P50 ja P70. Pakkasenkestävyyden kannalta hyvän huokosra-  
kenteen muodostumiseen vaikuttavat eniten vesisideainesuhde, sideaineen laa-  
tu, huokosilmamäärä, sen jakautuminen ja betonin jälkihoito. Kansirakenteiden  
betonin pakkasenkestävyysluokka on yleensä P20 tai P30, joissa ilmamäärän  
vähimmäisarvo on vesisideainesuhteesta riippuen 2 - 5 %. Pakkasenkestävyys  
todetaan joko suhteitustietojen, ilmamäärän tai jälkihoitoajan perusteella tahi  
rakenteesta poratuille näytteille tehtävän pakkas-suolakokeen avulla, [19].

#### Jälkihoitoaineet

TKK:lla tehdyssä diplomityössä [20] tutkittiin kirjallisuuden perusteella mm. be-  
tonin sideaineiden kovettumista ja jälkihoidon vaikutusta betonin ominaisuuksiin,  
jälkihoitomenetelmiä ja suositeltavia jälkihoitoaikoja. Kokeellisesti selvitettiin  
yhdeksän eri jälkihoitoaineen tehokkuus vesihöyrynläpäisevyyskokeella.

Parhaiten vesihöyrynläpäisevyyskokeessa kuivilla ja märillä betonipinnoilla me-  
nestyivät parafiiniemulsiot. Parafiiniemulsiot oli tutkimuksen mukaan poistettavis-  
sa korkeapaineisella vedellä, [20]. Parempi tapa on kuitenkin poistaa jälkihoito-  
ainejäämät hiekkapuhalluksella. Jälkihoitoainetta saattaa kuitenkin jäädä betonin  
pinnan pieniin koloihin hiekkapuhalluksesta huolimatta. Jälkihoitoainejäämät  
vaikuttavat haitallisesti eristyksen ja betonin väliseen tartuntaan.

Englannissa, Ruotsissa ja Saksassa siltakansien yläpinnoilla ei saa käyttää jälki-  
hoitoainetta, koska ne heikentävät vedeneristyksen tartuntaa alustaan. Ruotsis-  
sa ja Saksassa tulee sikäläisten työselitysten mukaan pitää siltakannen pinta  
kosteana ja lämmöneristyksellä peitettynä 5 vrk betonoinnin jälkeen, [8], [21],  
[22].



### Betonipinnan esikäsittelyaineet

Tanskassa tehtiin 1980-luvulla laaja tutkimus, jossa betonipinnan ja eristyksen välisiä tartunta-aineita (primereita) tutkittiin yhteensä 180 erilaisessa rakenteessa. Kokeissa levitettiin tartunta-aine kuivalle betonipinnalle ja säilytettiin sen jälkeen RH100% ilman kosteudessa, jonka jälkeen mitattiin tartuntalujuus. Tutkimusmenetelmä mittasi siten tartunnan pitkäaikaista pysyvyyttä staattisissa lämpötila- ja kosteusolosuhteissa, mikä ei vastaa kuplimisilmiöiden syntyolosuhteita, joissa paineet ja lämpötilat vaihtelevat eristyksen alla. Tartunnan heikkeneminen ajan mittaan helpottaa kuitenkin myös kuplien syntymistä, vaikka se ei niitä suoraan aiheuta. Tutkimuksen mukaan paras pitkäaikainen tartunta saavutettiin synteettisten tartunta-aineiden avulla. Esim. kloorikautsu-, akryyli-, epoksi- ja polyuretaanitartunta-aineiden avulla saavutettiin parempi tartunta kuin bitumiliuoksella. Tanskassa siirryttiin siksi käyttämään kloorikautsu- tai akryylihohjaisia primereita, [6].

Samoihin aikoihin Englannissa tehdyssä kenttäkokeessa olivat johtopäätökset eri pohjustusainetyyppien tartuntaominaisuuksista ja tartunnasta saman suuntaisia kuin Tanskassa, [23].

Itävallassa vertailtiin tartunta-aineen vaikutusta kermin tartunnan pysyvyyteen säilyttämällä kermieristettyjä betonilaattoja 104 vuorokautta siten, että niiden ala-osa oli 10...20 mm syvyydeltä +40 °C:een lämpöisessä vedessä. Menetelmällä on samoja puutteita kuplimisilmiöiden tutkimisen kannalta kuin yllä mainitussa tanskalaisessa menetelmässä. Ennen eristystä betonilaatat oli käsitelty joko Villas Pormex Rapid kumibitumiliuoksella tai epoksilla Villas Isoseal. Kermit (Villas GW B-18-S4) asennettiin osaan laatoista liimaten, osaan hitsaten. Tulokseksi saatiin, että pitkäaikainen lämmin märkäsäilytys vaikutti kumibitumiliuoksella pohjustettuihin kermirakenteisiin siten, että tartunta alkoi 35 vrk:n kuluttua irrota pohjustusaineen ja betonin välistä tartuntakokeessa. Nuoremmilla näytteillä irtoamis-pinta tartuntakokeessa oli liimausbitumin ja kermin väli tai hitsausbitumikerros. Pitkäaikainen lämmin kosteasäilytys muutti siten rakenteen heikoimmaksi rajapinnaksi pohjustusaineen ja betonin välin. Vanhennuksen loppuvaiheessa kermien tartuntalujuus ei täyttänyt enää vaatimuksia. Kun kermi oli asennettu epoksilla tiivistetyille pinnoille, tartunta säilyi olennaisesti paremmin kuin kumibitumiliuosta käytettäessä, [24].

Saksalaisten kokemusten mukaan oikein tehty epoksitiivistys on lähes poistanut kermieristysten kuplimisongelmat. Muun tyyppisistä hartsituotteista eristyksen primerina ei ole kokemuksia. Epoksiprimerin haittoina ovat olennaisesti bitumiprimeria korkeampi hinta sekä sen levitys- ja kuivumisolosuhtevaatimukset, jotka johtavat usein sääsuojahallin käyttöön.

Eristystä asennettaessa voi hitsausliekki vahingoittaa synteettistä pohjustusainetta (kloorikautsua, akryyliä tai epoksia). Tanskalaisen menetelmän mukaan suojataan pohjustusaine siksi ns. polymeeribitumilakalla, [25]. Pinnan tiivistysaineena käytettävän epoksin tulee olla hitsausliekin kuumuutta kestävää laatua.



### Kuplimisen syyt

Saksalainen W. Hensel käsittelee laajasti orgaanisten pinnoitteiden kuplimista betonialustoilla [26] ja esittää kuplimiselle seuraavia syitä:

- Eristyksen asennuksen yhteydessä syntyy kuplimista, kun ilma pyrkii ulos eristysalustasta lämpenemisen ja tilavuuden laajenemisen seurauksena. Tällaista kuplimista esiintyy, kun eristysalustan lämpötila on alhainen eristystyön aikana. Sama ilmiö esiintyy, kun eristys lämpenee asennuksen jälkeen.
- Samanlaisia ilmiöitä saattaa esiintyä myös, kun eristykseen tai alustaan sitoutuneet liuottimet pyrkivät ulos rakenteesta kuivumisprosessin alkamisen jälkeen.
- Muutamien viikkojen tai vuosien kuluttua saattaa eristykseen syntyä osmoosista riippuvia kuplia, jotka ovat seurausta hydroksidien liukenemisesta määrästä betonista. Nämä hydroksidit jakautuvat kuplien ja veden seokseen ja kulkeutuvat myös eristyksen ja alustan rajapinnalle. Tätä edistävä esim. betonin märkäsäilytys tai rakenteen läpikastuminen. Näiden prosessien aikana tukkii kalsiumkarbonaatti kapillaarihuokokset ( $D = 5-50$  nanometriä) ja suuremmat huokokset kutistuvat. Kalsiumkarbonaatti muodostaa betonilaatan ylimpään osaan puoliläpäisevän kalvon. Se merkitsee, että vesi ja kaasut voivat diffundoitua läpi, mutta liuenneet suolat eivät enää kulkeudu eteenpäin.

Lukuisten orgaanisilla pinnoitteilla tehtyjen tutkimusten [26] mukaan kuplat sisältävät pääasiassa alkalikarbonaatteja, kun taas orgaanisten yhdisteiden osuus on vähäinen. Kuplien sisällä saattaa osmoottinen paine nousta erittäin suureksi ( $3 \text{ N/mm}^2$ ). Orgaanisten aineiden pienet moolimäärät eivät voi saada aikaan kuplimisen edellyttämiä suuria osmoottisia paineita. Alkalihydroksidi tai alkalikarbonaatti ovat siten korkean osmoottisen paineen aiheuttajia.

Jotta kuplimista ylipäänsä voi tapahtua, tulee pinnoitteen tai muun pohjustuksen päällä välittömästi olevan kerroksen olla muodonmuutoskykyinen tai muuttua tällaiseksi esim. turpoamisen vaikutuksesta. Lisäksi täytyy sidoksen eri kerrosten välillä olla häiriintynyt.

Saippuoituvat sekä hydrolyysiä kestäättömät aineet orgaanisissa kerroksissa johtavat esim. tartuntaominaisuuksien heikkenemiseen. Kemiallisissa muutoksissa syntyvät reaktiotuotteet voivat nostaa vain vähäisessä määrin osmoottista painetta kuplassa.

Kuitubetonilaatoissa ja korkeamman lujuusluokan betoneissa (B55) nousi osmoottinen paine aiemmin kuin alemman lujuusluokan betoneissa (B15). Kuplien sisällön alkalipitoisuus ja pH-arvo olivat korkeamman lujuusluokan betoneissa olennaisesti suuremmat kuin heikommassa betoneissa, [26].

VTT:n julkisivubetonien pinnoitustutkimuksessa on myös todettu betonin lujuusluokan vaikuttavan tartuntaa heikentävien suolojen kulkeutumiseen betonissa pintaa kohden. Kulkeutuvat suolamäärät olivat suurempia pieni- ja korkealujuuksisilla betoneilla ja pienempiä ns. keskilujuuksisilla tuotteilla (K25-K40). Liukoiset emäksiset suolat lisäävät tartuntaa heikentävien ilmiöiden (kiteytyminen, osmoosi, saippuoituminen) esiintymisen todennäköisyyttä. Betonin lujuuden



lisääminen sementtimäärän kasvun ja vesisideainesuhteen pienentämisen avulla tekee betonista heikompi-  
lujuuksisia betoneja vaikeamman pinnoitus-  
alustan. Toisaalta myös hyvin alhainen lujuus ja suuri vesisideainesuhde johtavat  
lujuudeltaan heikkoon, hyvin huokoiseen ja ongelmalliseen betonipintaan, [27].

Englannissa tehdyissä tutkimuksissa on jo vuonna 1946 johdettu kaava kuplan  
sisällä olevalle kriittiselle paineelle, joka on kuplan syntymiseen tarvittavan ener-  
gian funktio, [21].

Saksassa oli 1960-luvulla kuplimisongelmia, kun eristyksinä käytettiin betoniin  
bitumilla liimattuja ohuita metallilevyjä. Kuplimisongelma poistui, kun eristuksen  
alle tehtiin paineentasauskerros lasikuitumaton avulla. Paineentasauskerroksen  
haitta oli kuitenkin, että eristuksen pienestäkin vuotokohdasta pääsivät vuotove-  
det leviämään laajalle alueelle eristuksen alla paineentasauskerrosta pitkin.

Siirryttäessä käyttämään kauttaaltaan alustaan liimattuja kermieristyskiä tulivat  
kuplimisongelmat Saksassa uudelleen esiin. Syyksi kuplien syntyyn on esitetty  
eristysalustan epätasaisuudesta ja karkeudesta johtuen kermin alle jääviä ilma-  
taskuja, kosteutta tai liuottimia. Koska kermieristys on suhteellisen vesihöyryti-  
ivis, aiheuttaa eristuksen alle ajan mittaan koloihin diffuusion kautta kertyvä kaa-  
su eristuksen kuplimista. Miksi paine ei pääse poistumaan betonin suuntaan  
selitetään seuraavasti: Betonin geeli-, kapillaari- ja suojahuokosissa on ilmaa 8 -  
15 %. Kovettuneen betonin sisältämä kosteus voi liikkua joko paine-eroista,  
kosteuspitoisuuseroista tai kapillaarisesta siirtymisestä johtuen. Betonin  
pintaosien ja syvempien kerrosten välillä on kosteusero eristuksen asennuksen  
jälkeen. Tiivis eristys estää kosteuden poistumisen ylöspäin. Kosteuserot  
tasoittuvat betonin pinnan ja syvempien kerrosten välillä lyhyen ajan kuluessa  
eristuksen jälkeen mm. kapillaarivoimien seurauksena siten, että huokokset ja  
kapillaarit täyttyvät vapaalla vedellä tai vesihöyryllä. Koska kuplia aiheuttava  
paine on pienempi kuin kapillaarinen paine, kuplien paine ei voi purkaantua  
betonin suuntaan, [10].

Suojakerroksen levityslämpötila (asfalttibetoni 150 °C ja valuasfaltti 240 °C) ai-  
heuttaa ensimmäisen suuren rasituksen betonin huokosissa olevalle kaasulle.  
Kuiva ilma käyttäytyy kuten ideaalikaasu, jonka paineen nousu vakiotilavuudes-  
sa on suoraan verrannollinen lämpötilan nousuun. Samalla bitumi pehmenee  
lämpötilan noustessa ja aiheuttaa kuplimisen. Kuumina kesäpäivinä asfaltin  
pinta saattaa nousta 75 °C lämpötilaan, mikä aiheuttaa toisen lämpörasituksen.  
Jos huokosissa oleva kaasu olisi kuivaa ilmaa, syntyisi niissä olennaisia paineen  
nousuja vain suojakerrosta tehtäessä. Huokosissa on kuitenkin ilman lisäksi  
aina myös vettä. Kokonaispaine muodostuu siten kuivan ilman ja vesihöyryn  
osapaineista. Jos kuplimisen aiheuttavat liuotinainejäämät, nostavat ne edelleen  
kokonaispainetta huokosissa. Kuumina kesäpäivinä esiintyy vauriomekanismi:  
aurinko lämmittää asfaltin, huokosissa olevan ilman ja vesihöyryn paine ja  
tilavuus kasvavat, jäähtymisvaiheessa kuplat osittain säilyvät jäähtyessään  
jäykistyvässä bitumia sisältävässä kerroksessa ja kupliin syntyvä alipaine imee  
kosteutta betonin alemmista kerroksista, [10].

Vuoden 1976 eristysohjeissa Saksassa määrättiin, että tiiviin (tyhjätilattoman)  
päällyste-  
n alla tuli olla myös tyhjätilaton eristuksen suojakerros. Perusteena oli-



vat havainnot, että valuasfalttikulutuserroksen alla olevaan asfalttibetonisuoja-kerrokseen jäävä vesi aiheutti lämpiminä kesäpäivinä ja talvella jäätymisvaurioiden seurauksena päällysteen kuplimista, [10].

Saksalaisessa BAM-tutkimuslaitoksessa on tutkittu erilaisten eristysrakenteiden kuplimista laboratoriokokeissa syklisen lämpövanhennuksen vaikutuksesta. BAM:in menetelmässä käytettiin suuria  $100 \times 100 \times 20 \text{ cm}^3$  betonilaattoja, joiden yläpinnat eristettiin erilaisilla eristysrakenteilla ja suojattiin suojakerroksella. Suojakerroksen yläpintaa lämmitettiin syklisesti 40 kertaa 6 h ajan lämpötilaan  $+70 \text{ }^\circ\text{C}$  ja lämmitysvaiheiden välillä lämmitys oli 6 h pois päältä. Muuttujana kokeessa oli betonipinnan makrokärkeus (0,5-3 mm). Alumiinipintainen yksikermirakenne ja polyisobutyleenikermi kuplivat jo pinnan karkeuden syvyyden ollessa 0,5 mm. Kaksikermirakenne ei kuplinut kokeessa, [10].

Saksassa on tehty myös laaja kenttäkoe avaamalla eristys 99 sillalta. Silloista tutkittiin kansibetonin kloridit ja eristuksen kuplimisvauriot. Tutkituista kermieristysrakenteista todettiin kuplia eristyksen alla 2/3 osalla (21 sillan 240 poranäytteestä). Eristys koostui bitumiliuoksella pohjustetulle alustalle asennetusta metallipintaisesta yksikermirakenteesta. Silloilla avattiin 16 kuplaa, joista 10 oli eristyksen ylä- ja 6 alapuolella. Näillä silloilla oli tartunta-aine ollut bitumipohjainen ja kermi oli kiinnitetty hitsaamalla. Bitumiliuoksella pohjustetulle betonialustalle asennettuja kaksikermirakenteita (aluskermi liimattu ja pintakermi hitsattu) tutkittiin 13 sillalla. Silloilla avattiin 26 kuplaa, joista 77 % oli syntynyt eristyksen yläpuolelle. Eristyksen yläpuolelle syntyneen kuplan aiheuttajaksi todettiin asfalttibetoninen suojakerros tiiviin valusasfaltin alla, [28].

Liutinvapaalla epoksilla tiivistetyille betonikansille hitsaamalla asennettuja yksikermirakenteita tutkittiin kuudella sillalla ja liimaamalla kiinnitettyjä kaksikermirakenteita kahdella sillalla. Näillä ei todettu kuplia, [28].

BAM tutki samaan aikaan kuplimisen syitä. Johtopäätöksenä oli, että kuplimisen aiheuttivat bitumiprimerin liuotinjäätymät ja betonin kosteus, [6].

Myös Englannissa on myös tehty kuplimisen syitä selvitteleviä tutkimuksia. Näiden tutkimusten tuloksia ei ole kuitenkaan julkaistu. Kuplimisen syiksi esitetään Englannin liikenneministeriön kirjeessä seuraavaa: Hydrataatioprosessissa muodostuu betoniin kapillaari- ja geelihuokosia, jotka saattavat sisältää ilmaa. Lämpötilan ja paineen vaihdellessa tämä ilma saattaa nousta betonin pintaan ja aiheuttaa eristykseen neulamaisia reikiä ja kuplia. Ne ovat vähemmän todennäköisiä kermejä käytettäessä, mutta eristysmassoilla saattaa esiintyä neulamaisia reikiä, kuplia ja kuplien puhjetessa reikiä, kun massa on vasta osittain kovettunut. Tutkimus on osoittanut, että vallitseva syy kaasun purkautumiseen ulos betonista on betonin lämpötilan vaihtelu, joka saa aikaan kaasun laajenemisen betonin huokosissa, [29]. Jordan TRL:stä toteaa, että tällä tavoin kuplia syntyy yleisimmin sateen jälkeen, kun aurinko alkaa lämmittää pintaa pilvien hälvettyä. Kaasujen ulos purkautuminen riippuu betonin kaasunläpäisevyydestä ja kasvaa ilmahuokosten määrän kasvaessa, [7].

Tanskassa tehtiin vuonna 1993 tutkimus, jossa kerättiin tiedot 38:sta eristystyöstä. Näistä kuplimista esiintyi enemmän tai vähemmän 13:ssa kohteessa. Kupli-



minen ei ollut riippuvainen betonin ominaisuuksista. Ainoat parametrit, jotka merkittävästi selittivät kuplimisen syntymistä, olivat eristysajankohdan kosteus- ja lämpötilaolosuhteet. Myös eristysalustan halkeamat olivat todennäköisesti osasyynä kuplimiseen, [30].

VTI:n raportin [25] mukaan kuplimisen ja tartunnan irtoamisen eristyksessä ja eristyksen alla oletetaan yleensä ensi sijassa olevan kosteuden vaikutusta. Ilma-kuplat, kosteus tai liuotinaineet voivat eri olosuhteissa aiheuttaa kuplimista ja tartunnan irtoamista. Tartunnan irtoaminen ei välttämättä heikennä eristyksen eristyskykyä, mutta voi aiheuttaa päällystevaurioita. Suuret lämpötilavaihtelut, eristyksen, eristyksen suojauksen ja päällystyskerroksen pitkä aikaväli ja ohuet päällystekerrokset voivat edistää kuplimista.

Ruotsissa on tutkittu kuplimista laboratoriotutkimuksella ja todettu vanhennuskokeen jälkeen eristyksen kuplimista. Erityisesti syklinen lämpövanhennus +70 °C:ssa aiheutti kuplia. VTI:n tutkimusmenetelmä mittaa ensi sijaisesta eristyksen kykyä kestää lämpörasitusta sekä kerman sisäisiä tartuntaominaisuuksia, [6], [25].

Hensel [26] esittää kuplimisen syiden selvittämistä tutkimalla infrapunaspektroskooppisin tutkimuksin kuplineita kerroksia mukaan lukien niiden lisäaineet, erityisesti pohjustusta ja sen päällä olevaa kerrosta. Sen avulla voidaan selvittää, onko käytettyjen raaka-aineiden huonon alkalikestävyyden vuoksi tartunta heikentynyt betonin ja pohjustuksen välissä tai pohjustuksen ja seuraavan kerroksen välissä.

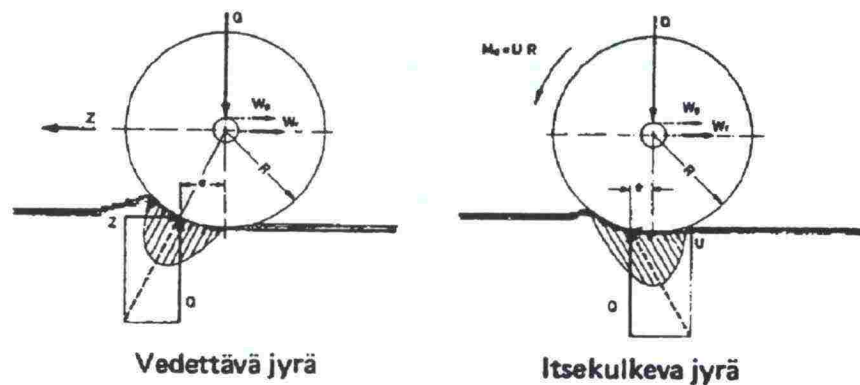
Kuplien sisällön analyysillä voidaan todeta, sisältääkö se tavanomaisten epäorgaanisten suolojen (esim. kaliumhydroksidi, kaliumkarbonaatti, natriumhydroksidi, natriumkarbonaatti) ohella myös pienimolekyylisiä aineita, esim. liuottimia (etanoli, isopropanoli, metyylietyyliketoni, butyyliasetaatti ym.). Pohjustusaineisiin lisätään usein liuottimia, jotta niiden viskositeetti alenisi ja tunkeutumiskyky paranisi. Tämä on huono ratkaisu siksi, että hyvälaatuisen betonipintaan tunkeutuu tehokkaassa määrin vain pienimolekyylinen liuotin eikä suurimolekyylinen sideaine.

Tanskalaisen laboratoriotutkimuksen [31] mukaan eniten kuplimista esiintyi betonilla, joka oli kuivunut 2-3 viikkoa betonoinnin jälkeen eli nykyisen tanskalaisen käytännön mukaisesti. Syyksi esitettiin betonin pintaosien huokosten kuivumista, jolloin vesihöyrylle jää enemmän tilaa. Kuplimista voitiin vähentää, jos betonin annettiin kuivua olennaisesti pitemmän ajan tai asentamalla kermi märälle, jopa kastellulle betonipinnalle. Märän betonipinnan eristäminen poikkeaa täysin nykykäytännöstä. Nämä tulokset tulisi varmentaa usean vuoden seurannalla ennen tämän suuntaisia ohjeita.

Eristyksen ja suojakerroksen oikea asennustapa on hyvien materiaalien ohella edellytys eristystyön onnistumiselle. Siltakermien levityssuunnasta ei nykyisessä SYL 6:ssa ole annettu ohjeita. Vanha SYT 6 vuodelta 1992 sisälsi enemmän työn tekemisen ohjeita ja ne edellyttivät, että kermi tuli levittää sillan pituussuuntaan. Sen jälkeen kun TIEL:n ohjeista jätettiin pois kermien levityssuuntaa koskevat ohjeet, on kermejä alettu levittää myös sillan poikkisuuntaan.

Ranskan siltanormit [9] edellyttävät, että kermit tulee asentaa sillan pituussuuntaan. Perusteluna on, että muutoin kermit saattavat liukua kuumaa päällystettä jyrättäessä. Kun kermien poikkisaumat tehdään viereisillä kermikais-toilla eri kohtiin, estää jyrän massa kermiä liukumasta jyräyssuunnassa.

Jyräystapa vaikuttaa myös riskiin kermien liukumisesta jyräyksen aikana. Vetävä valssi aiheuttaa pienemmän vaakasuuntaisen voiman asfalttiin kuin vedettävä valssi, [32]. Eristyksen suojakerrosta jyrättäessä tulisi molempien valssien vetää. Jos jyrässä on vain yksi vetävä valssi, tulisi suojakerros jyrätä aina vetävä valssi edellä. Erityisesti tämä korostuu, kun sillalla on suuri pituuskaltevuus ja suojakerrosta jyrätään alamäkeen hellepäivänä (kuva 4).



Kuva 4. Vedettävän ja itsekulkevan jyrävalssin vaaka- ja pystysuuntaiset voimat [32].

Saksan normien [5] mukaan tulee kermien pysyä suojakerrosta tehtäessä liukumatta 4 % pituuskaltevuuteen asti. Hitsattavan kermin asennuksessa tulee käyttää kerralla koko kermin leveydeltä hitsausbitumin sulattavaa rivipoltinta. Kermit saa asentaa joko sillan pituus- tai poikittaissuuntaan.

Kuvassa 5 on esitetty korkealaatuinen sveitsiläinen sääsuojahalli. Sen kannatinkaaret ovat putkia, joita pitää ylhäällä paineilma, [35].





Kuva 5. Sääsuojahalli sveitsiläisellä siltatyömaalla, [35].



### 3 KOKEELLISET JA TEOREETTISET TUTKIMUKSET

#### 3.1 Lämpötila- ja kosteustutkimukset

##### 3.1.1 Yleistä

Kosteusliikkeet ja pinnan lämpötilavaihteluista eristyksen alle syntyvät paineet ovat primäärisyy siltaeristysten kuplimiselle. Siksi siltakannen kosteus- ja lämpötilajakaumien käytännöllinen ja teoreettinen hallinta on ensiarvoisen tärkeää pyrittäessä erittelemään ja eliminoimaan eristysten kuplimisen syitä.

Teoreettisilla laskelmilla ja siltakohteissa tehdyillä kokeellisilla mittauksilla selvitettiin, mitkä ovat siltakannen todelliset lämpö- ja kosteusolosuhteet ennen eristystä ja eristyksen jälkeen. Näiden pohjalta voidaan tehdä päätelmiä kermeihin kohdistuvista paineista ja muista rasituksista. Teoreettisilla laskelmilla haluttiin myös hankkia taustatietoa Tielaitoksen ohjeistukselle siitä, miten eristysalustaa tulisi kuivattaa ennen eristystyötä. Osavastauksia tähän ongelmaan haettiin betonin kuivumisnopeutta koskevalla tutkimuksella. Suomen eristysolosuhteita tutkittiin ilmastotutkimuksella, jossa selvitettiin, kuinka suuri osuus koko eristystyöajasta on SYL6:n olosuhdemääräykset täyttävää työaikaa, [3].

##### 3.1.2 Aineisto ja tutkimusmenetelmät

###### 3.1.2.1 Teoreettiset laskelmat

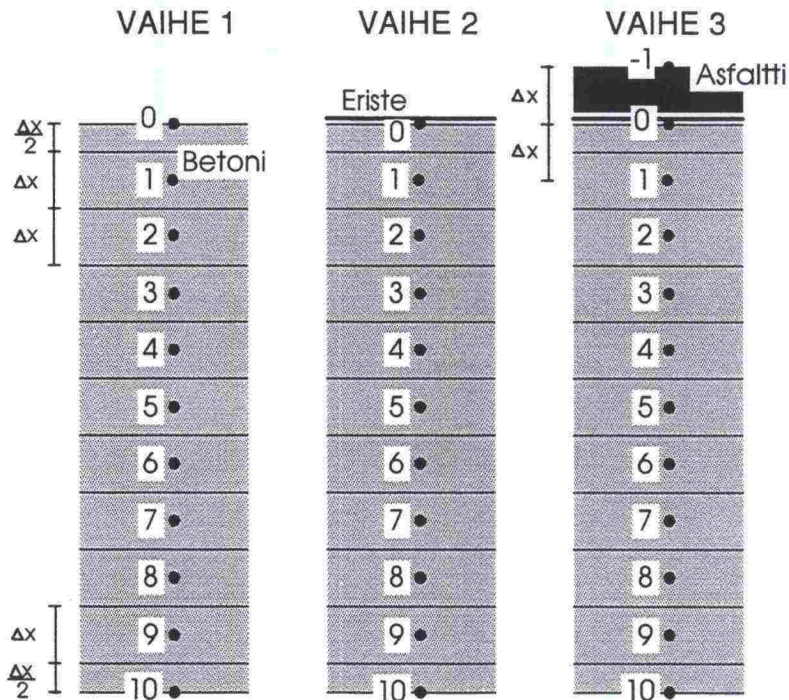
Tutkimuksen teoreettisen osan tavoitteena oli kehittää laskentamalli, jolla voidaan simuloida sillan kannen sisäisiä lämpötiloja ja kosteuspitoisuuksia ulkoisten sääolojen vaihdellessa. Lisäksi tarkoituksena oli arvioida laskennallisesti kermin alle kehittyviä paineita.

Laskelmissa tarkastellaan 1,0 m:n paksuista siltalaattaa. Lämpötilat ja kosteuspitoisuudet esitetään 11 pisteessä kuvan 6 mukaisesti (laskentapisteet 0 - 10). Laskentapisteiden välimatka on 0,1 m ( $= \Delta x$ ) ja aikadifferenssi 1 h ( $= \Delta t$ ).

Rakenneoletukset eivät pysy samana koko laskentaproseduurin aikana, sillä eristys- ja päällystystyöt aiheuttavat siinä muutoksia. Laatan valun jälkeen laatan yläpinnan oletetaan olevan paljas ts. betoni on tietyn ajan suoraan säälle alttiina (vaihe 1). Eristys muodostaa kannen yläpintaan kosteussulun aiheuttaen pinnassa myös lämpötekniisiä muutoksia (vaihe 2). Eristyksen päälle levitettävä noin 10 cm:n paksuinen asfalttikerros aiheuttaa jälleen lämpöteknisesti uuden tilanteen, koska asfalttikerroksen eristävä vaikutus on otettava huomioon (vaihe 3). Laskennassa otetaan tässä vaiheessa uusi rakennepiste (-1) käyttöön. Lämpötilat ja kosteuspitoisuudet esitetään kuitenkin ainoastaan betonilaatassa (pisteissä 0 - 10).

Laatan yläpintaan vaikuttavia säättekijöitä ovat ulkoilman lämpötila, suhteellinen kosteus, tuuli, auringon säteily ja sateet. Laatan alapinnan oletetaan

olevan suojassa auringon säteilyltä ja sateilta. Sillan oletetaan sijaitsevan lähellä Helsinki-Vantaan lentoasemaa, jonka säähavaintotietoja on käytetty laskennan pohjana. Laskentaperusteita, jotka on esitetty väliraporteissa [1, 2], ei esitetä tässä raportissa.



Kuva 6. Laatan laskentapisteet ja laskentaproseduurin vaiheet.

### 3.1.2.2 Kosteus- ja lämpötilamittaukset siltarakenteessa

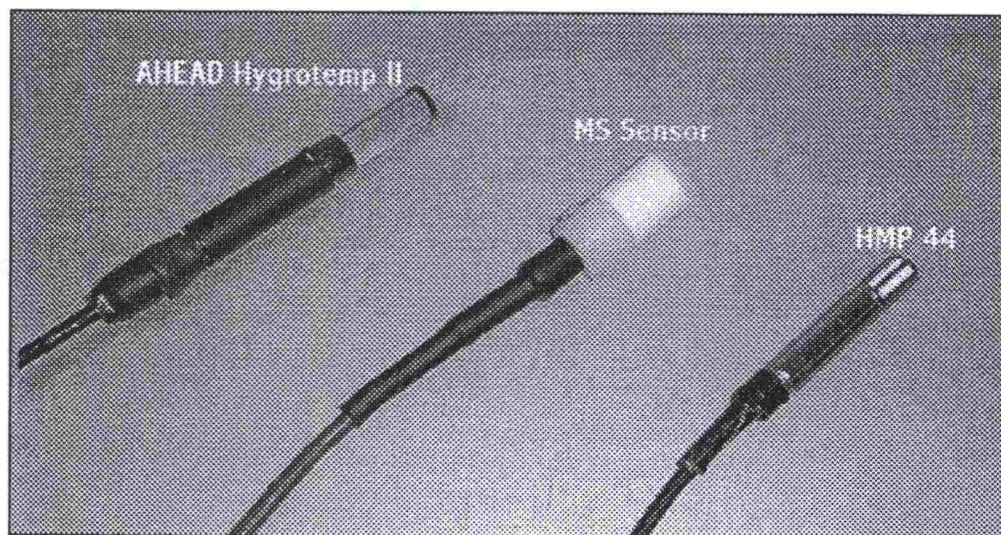
Tutkimuksen tavoitteena oli selvittää betonisten siltakansien suhteellisen kosteuden ja lämpötilan ajallisia muutoksia käyttäen uusinta mittaustekniikkaa. Tutkimuksessa seurattiin kolmen sillan kansilaatan suhteellisia kosteuksia ja lämpötiloja seuraavasti:

- Iittalan risteyssilta. Seurantamittaukset on aloitettu 3.10.1995 ja jatkuvat edelleen.
- Kasarmintien ylikulkusilta, Oulu. Seurantamittaukset on aloitettu 17.4.1997 ja jatkuvat edelleen.
- Pakinkylän risteyssilta S 6, valuosa 3 (Kehä 1:n ja Tuusulantien risteys), Helsinki. Seurantamittaukset on aloitettu 26.6.1997 ja jatkuvat edelleen.

Betonin suhteellisen kosteuden mittaaminen ulkoilmaolosuhteissa on osoittautunut vaikeaksi, koska säätilan vaihtelut vaikuttavat mittaustulokseen. Mittaustulosten epätarkkuuden selvittämiseksi on tutkimuksessa käytetty kolmen eri valmistajan antureita ja kahta eri mittaustekniikkaa. Ensimmäinen mittaustekniikka on perinteinen menetelmä, jossa anturi (mittapää) asetetaan betoniin porattuun reikään ja suhteellinen kosteus porareikässä luetaan anturiin liitetyn näyttölaitteen lukeman tasoituttua [1]. Uu-



nessa mittausmenetelmässä käytettävät anturit jäävät betoniin pitemmäksi aikaa ja ne liitetään tiedonkerääjään, joka tallentaa automaattisesti mittaus- tuloksia ohjelmoinnin mukaan. Toisessa uudessa menetelmässä anturit va- letaan betonin sisään, jolloin niillä voidaan seurata betonin kuivumista valu- hetkeä alkaen (kuva 7, taulukko 6).



Kuva 7. Kosteus- ja lämpötilamittauksissa käytetyt anturit.

Taulukko 6. Anturien valmistaja- ja asennustietoja.

Anturi	Valmistaja	Asennus	Mittaus
MS-Sensor	Sahléns Fuktkontroll, Malmö, Ruotsi	Valetaan betoniin	Tiedonkerääjä
AHEAD Hygrotemp II	Coating International, Oslo, Norja	Asennetaan porareikään	Tiedonkerääjä
Vaisala HMP 44	Vaisala Oy, Vantaa, Suomi	Asennetaan porareikään	Käsimittaus

Mittauslaitteet ja mittauksen suorituksen yksityiskohdat on esitetty tarkem- min väliraporteissa [1] ja [2].



## 3.1.2.3 Betonin kuivumisnopeus

Tutkimuksen tarkoituksena oli selvittää normaalien siltabetonien kuivumisnopeus laboratorio-olosuhteissa. Kuivumisnopeusmittaukset tehtiin kolmella betonilla, joiden suhteitustiedot on esitetty taulukossa 7. Määritetyt puristuslujuudet ja ilmapitoisuudet on esitetty taulukossa 8.

Taulukko 7. Koebetonien suhteitustiedot

Betoni	Sementti-laatu	K-lujuus	P-luku	w/b	ilma-pit. %	Sem. määrä kg/m <sup>3</sup>	Vesi-määrä kg/m <sup>3</sup>	Lisä-aineet
1	Yleis/CemIIA	35	32	0,48	4,5	347	168	Ilma-Parmix
2	Rapid/CemIIA	35	26	0,54	4,5	317	171	Ilma-Parmix
3	Rapid/CemIIA	47	- *)	0,47	2,0	400	187	- *)

\*) ei P-lukubetoni.

Taulukko 8. Koebetonien puristuslujuudet ja ilmapitoisuudet.

Betoni	Puristuslujuus (keskiarvo) MPa	Ilmapitoisuus (tuoreesta betonista) %	P-luku
1	42,7	4,2	31
2	35,3	6,0	28
3	52,3	2,3	- *)

\*) ei P-lukubetoni

Kustakin betonilaadusta tehtiin kolme palkkia (100 x 100 x 500 mm<sup>3</sup>). Palkit eristettiin päistä ja kahdelta vastakkaiselta sivulta liimattavalla kumipinnoitteella, joka estää kosteuden virtauksen näiltä pinnoilta. Täten saatiin aikaan yksidimensionaalinen kosteuden virtaus, joka helpottaa tulosten tulkintaa. Ennen eristystä ja eristyksen jälkeen koekappaleita säilytettiin 98 %:n suhteellisessa kosteudessa.

Kuivumismittaukset aloitettiin 29.7.1996, jolloin punnittiin palkkien massat kokeen alussa, minkä jälkeen palkit siirrettiin 70 %:n suhteelliseen kosteuteen. Ensimmäisen vuorokauden aikana koekappaleiden massaa seurattiin punnitukseen 1-2 tunnin välein. Sen jälkeen mittaukset tehtiin 1-2 vuorokauden välein ensimmäisen viikon aikana ja edelleen sen jälkeen 1-2 viikon välein. Mittaukset lopetettiin 10.1.1998, jolloin koekappaleet olivat olleet 70 %:n suhteellisessa kosteudessa 540 vuorokautta.

### 3.1.2.4 Eristysolosuhteet

Eristysolosuhdetutkimuksen tarkoituksena oli selvittää vuoden aikana eristystyöhön soveltuvan päivittäisen työajan pituus. Ennen eristystyötä ja eristysajankohtana vallitsevista sääolosuhteista riippuu, voidaanko eristystyö ylipäänsä toteuttaa suunnitellun aikataulun mukaan. Lisäksi sääolosuhteilla on merkittävä vaikutus eristystyön onnistumiseen ja työn laatuun.

SYL 6:ssa on annettu ohjeet eristystyöhön soveliaista sääolosuhteista. SYL:n vaatimusten mukaan sateen jälkeen pinnan on annettava kuivua 2 vrk tai kosteus on määritettävä mittaamalla ennen eristystä. Ilman suhteellinen kosteus eristystyön aikana saa olla korkeintaan 85 %. Eristettävän pinnan lämpötilan tulee olla vähintään 3°C ilman kastepistelämpötilan yläpuolella. Tutkimuksen suoritusajana voimassa olleessa (v. 1992) SYL 6:ssa ei asetettu vaatimusta ilman lämpötilalle kermieristystöiden aikana. Seuraavassa tarkastelussa on oletettu, sen tulee olla vähintään 5°C.

Tutkimuksen perusaineistona käytettiin nk. TESTI-vuoden säätiedostoa, joka on Ilmatieteen laitoksen lähinnä energiantarvelaskelmia varten kehittämä 'normaalivuosi'. Tämä tiedosto käsittää säätiedot kolmelta paikkakunnalta: Vantaalta, Jyväskylästä ja Sodankylästä. Säätiedostoon on sisällytetty 22 suuretta, jotka on mitattu, arvioitu (= säähavainnot) tai laskettu. Tässä tutkimuksessa käytetyt säätiedot olivat seuraavat (suluissa kunkin suureen tallennustarkkuus tai vaihteluväli):

- lämpötila (0,1°C)
- suhteellinen kosteus (1%)
- vallitseva sää (0...99)
- tuulen nopeus (m/s)
- globaalin säteilyn keskimääräinen teho ( $W/m^2$ )
- diffuusin säteilyn keskimääräinen teho ( $W/m^2$ )
- sademäärä (0,1 mm).

Säähavainnot on tehty kolmen tunnin välein, paitsi auringonsäteilyhavainnot, jotka on rekisteröity tunnin välein sekä sademäärän mittaukset, jotka on tehty klo 8 ja 20. Kolmen tunnin välein olevista havainnoista on mitatuille suureille laskettu tunneittaiset arvot lineaarisella interpolaatiolla.

Tutkimuksessa vuosittainen työaika rajattiin huhtikuun ja lokakuun välille. Sallitun päivittäisen työskentelyajan kriteerit olivat:

- ulkolämpötila suurempi kuin 5°C ( $T_u > 5^\circ C$ )
- eristettävän pinnan lämpötilan on oltava 3 °C kastepistelämpötilan yläpuolella ( $T_p > T_s + 3^\circ C$ )
- ilman suhteellinen kosteus pienempi kuin 85 % ( $RH < 85\%$ )
- ei sada (yli sallitun määrän, 2 vaihtoehtoa) ja ennen eristämistä on oltava 2 vuorokautta poutaa.

Tutkimus suoritettiin laskemalla TESTI-vuoden säätilastosta Excel - ohjelmalla ne tunnit huhti - lokakuun aikana, jolloin edellä mainitut kriteerit olivat voimassa. Ulkoilman lämpötilaa ja suhteellista kosteutta koskevien ehtojen täyttyminen laskettiin suoraan säätiedoston tiedoista.



Eristystyön estävä sademäärä otettiin huomioon kahden vaihtoehtoisen kriteerin mukaan, koska työn estävää sademäärää ei ole määrätty laatuvaatimuksissa:

Vaihtoehto a: Sateiksi laskettiin kaikki mitattavat sateet (ei nk. 0-havaintoa, joka tarkoittaa, että 12 tunnin aikana on sataanut, mutta sade on ollut niin vähäistä, että sitä ei ole voinut mitata).

Vaihtoehto b: Sateiksi laskettiin havainnot, joiden mukaan sademäärä ylitti 5 mm 12 h aikana.

Pinnan lämpötila ja kastepistelämpötila määritettiin laskennallisesti säätiendoista olettaen rakenteen pinnaksi noin 700 mm paksun kansilaatan yläpinta. Kastepisteellä tarkoitetaan sitä lämpötilaa, jossa vallitseva vesihöyryn paine saavuttaa kyllästysarvonsa.

### 3.1.3 Tulokset

#### 3.1.3.1 Teoreettiset laskelmat

##### *Lämpötilat ja kosteuspitoisuudet*

Laskelmissa esitetään lämpötilat ja kosteuspitoisuudet lähtien rakenteen valusta, joka oletetaan tapahtuvaksi kesäkuun alussa. Eristäminen tapahtuu kuukausi valun jälkeen, siis heinäkuun alussa, ja asfalttipäällystys viikko eristämisen jälkeen. Lämpötilojen ja kosteuspitoisuuksien vuorokausivaihtelut esitetään kesä- ja heinäkuun ajalta sekä kausivaihtelut yhden vuoden ajalta kesäkuusta kesäkuuhun.

Kuvissa 8-9 esitetään valun jälkeiset lämpötilat ja kosteuspitoisuudet kuukauden ajalta laatan laskentapisteissä 0, 1, 5, 9 ja 10. Massan valulämpötilaksi on oletettu +15 °C. Muutaman tunnin jälkeen valusta lämpötila alkaa nopeasti nousta sementin hydrataation lähtiessä käyntiin. Lämpötila on korkeimmillaan seuraavan vuorokauden alussa, jolloin laatan keskipisteen lämpötila on noin 63 °C. Sekä ylä- että alapinnassa lämpötila on selvästi alhaisempi. Hydrataation vaikutus lämpötiloihin häviää noin kahden viikon kuluessa valusta. Tämän jälkeen lämpötilat riippuvat ainoastaan säätekijöiden aiheuttamasta vuorokausivaihtelusta.

Vuorokausivaihtelu johtuu osaksi ilman lämpötilan vaihtelusta osaksi auringon säteilystä, joka kohdistuu päivisin laatan yläpintaan. Laatan alapinnassa vaikuttaa ainoastaan ilman lämpötila aiheuttaen laskentapisteen 10 lämpötilaan ainoastaan noin 4 °C:n vuorokausivaihtelun (alin lämpötila on 13 - 15 °C). Laatan yläpinnassa pilvisinä päivinä auringon säteily tulee hajasäteilyinä. Tällöin laskentapisteen 0 vuorokausivaihtelu on noin 8 °C. Aurinkoisina päivinä, jolloin auringon säteily tulee suorana, vuorokausivaihtelu on luokkaa 19 °C. Ylin lämpötila on noin 35 °C. Aivan laatan keskelläkin lämpötila vaihtelee 1-2 °C.



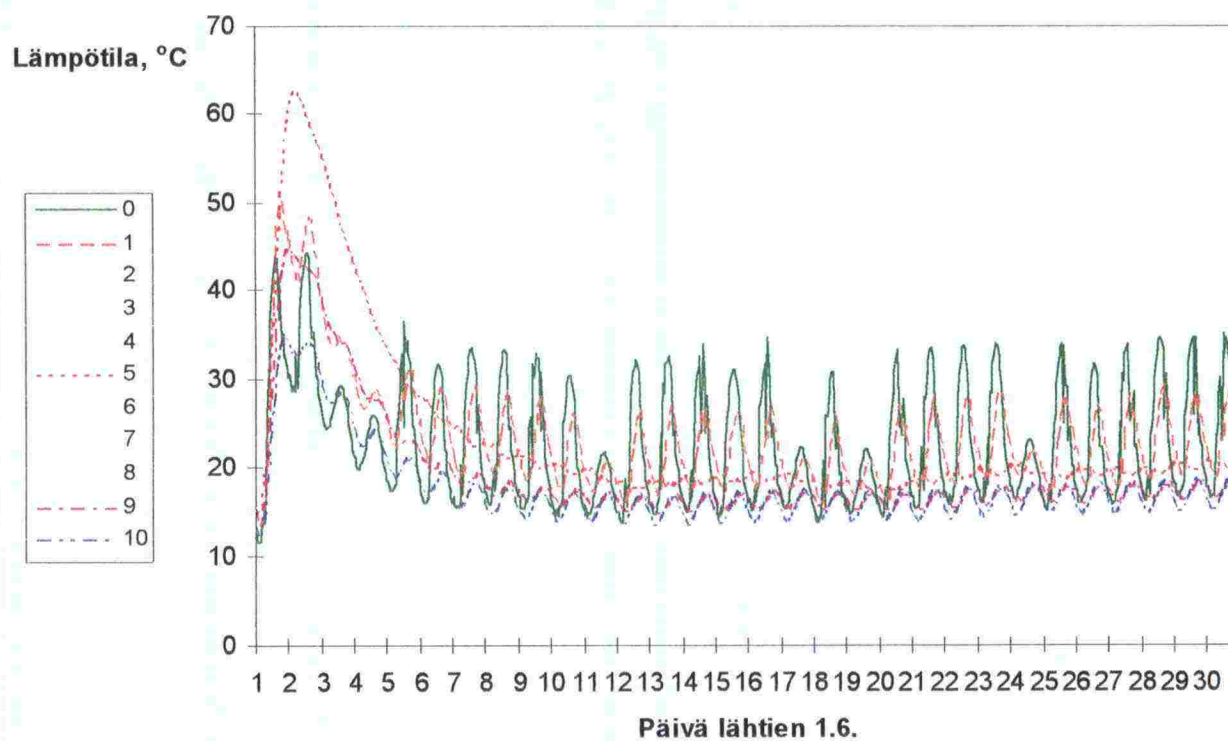
Tuoreen betonin suhteellinen kosteus on aluksi luonnollisesti 100%. Sementin hydratoituessa sementtiin sitoutuva (huokosista poistuva) vesimäärä on tilavuudeltaan suurempi kuin huokostilavuuden pieneneminen vastaavana aikana. Näinollen betonissa tapahtuu sisäistä kuivumista, mikä näkyy suhteellisen kosteuden pienenemisenä. Jos laatan yläpintaa kostutetaan jatkuvasti vedellä ensimmäisen 7 d ajan, kuten on oletettu, laatan ylimmässä pisteessä suhteellinen kosteus ei kuukauden aikana laske ollenkaan 100%:n alapuolelle, koska jälkihoitovesi ja 7 d:n jälkeen sateet täyttävät hydrataatiokuivumisesta aiheutuvan kosteusvajeen. 10 cm:n syvyydessä (laskentapiste 1) hydrataatiokuivuminen vaikuttaa jo selvästi laatan alkukosteuspitoisuuteen, mutta myöhemmin kosteuspitoisuus jonkin verran kasvaa yläpinnasta imeytyvän kapillaariveden johdosta. Laatan keskellä ja alapinnassa kapillaarivesi ei vaikuta enää lainkaan ja suhteellinen kosteuspitoisuus asettuu noin arvoon 88%. Vuorokausivaihtelua ei voi juurikaan havaita.

Kuvissa 10-11 esitetään lämpötilat ja kosteuspitoisuudet eristuksen jälkeen. Eristystapahtuma näkyy lämpötilapiikkinä aivan kuvan 10 vasemmassa laidassa. Piikin myöhemmät vaikutukset ovat vähäisiä. Eristyksen levitys vaikuttaa kuitenkin sen, että vuorokautiset lämpötilavaihtelut laatan yläpinnassa ovat suuremmat kuin ennen eristystä. Tämä johtuu säteilyn absorptio-kertoimen kasvusta. Eristyksen tumma sävy vaikuttaa säteilyn absorptioon ja sitä kautta lämpötilan kasvuun laatan yläpinnassa. Huippulämpötilat ovat lähes 45 °C. Laatan keskipisteen tai alapinnan lämpötiloihin eristyksellä ei ole vaikutuksia.

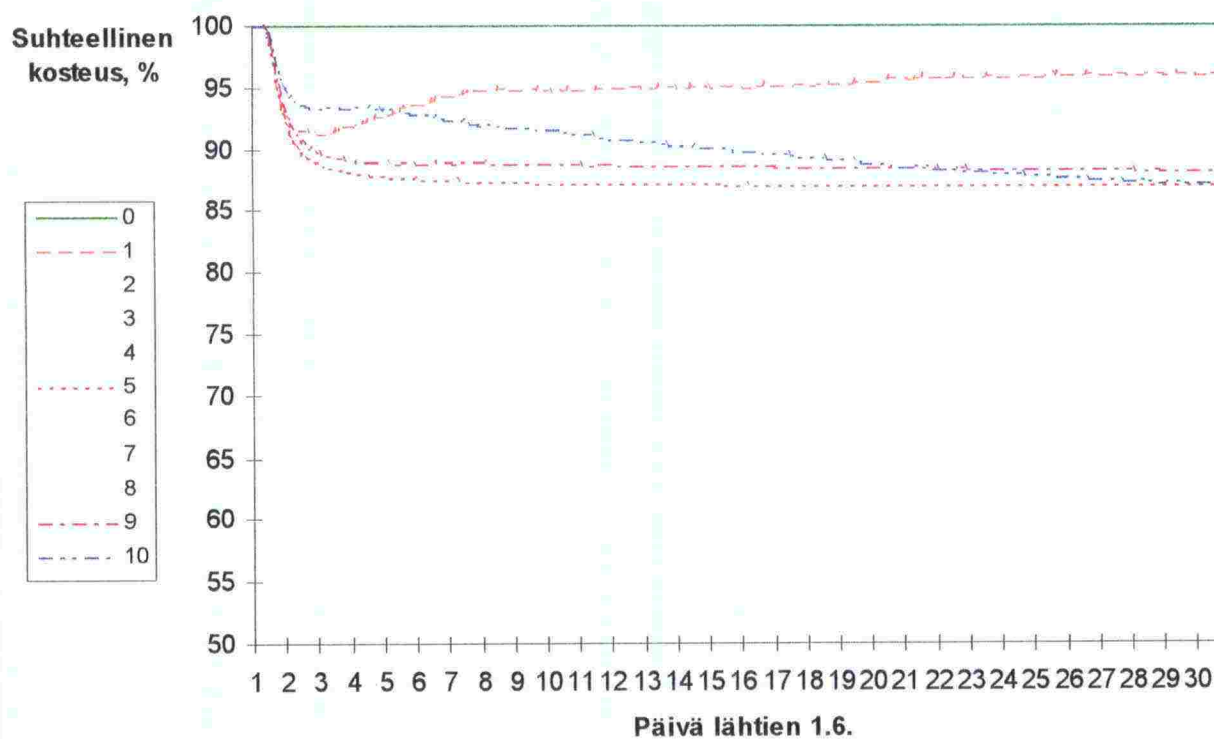
Asfaltointi näkyy voimakkaana lämpötilapiikkinä 38 päivän kohdalla. Senkin myöhemmät vaikutukset ovat vähäisiä. Asfaltin säteilyn absorptio-kertoimen on oletettu olevan sama kuin eristyksellä. Vuorokautiset lämpötilavaihtelut kuitenkin pienenevät asfaltoinnin jälkeen, koska asfaltin pintaan kehittyvän lämmön on johduttava noin 10 cm:n paksuisen asfalttikerroksen läpi betonilaattaan. Rakenne tulee siis paksummaksi ja tarkasteltava 0-piste ei ole enää rakenteen pinnassa. Huippulämpötilat asfaltoinnin jälkeen ovat samaa suuruusluokkaa kuin ennen eristystä eli noin 35 °C.

Eristyksen jälkeen betonin suhteellinen kosteus asettuu tilaan, jossa yläpinnan kosteuspitoisuus on korkein ja alapinnan pienin. Aivan kuukauden lopulla yläpinnassa suhteellinen kosteus laskee hieman 100%:n alapuolelle. Pisteessä 1 suhteellinen kosteus on noin 96%. Laatan keskeltä alapintaan suhteellinen kosteus on lähes vakio, 86 - 88%.

Kuvissa 12-13 esitetään lämpötilat ja kosteuspitoisuudet laatussa ensimmäisen valun jälkeisen vuoden aikana. Lämpötilat ja kosteuspitoisuudet ilmoitetaan päivittäin klo 14. Ajankohdan valinta johtuu siitä, että lämpötilat ovat oletettavasti korkeimmillaan noin klo 14. Lämpötilat ja kosteuspitoisuudet talven aikana ovat kiinnostavia mahdollisten jäätympaineiden johdosta.

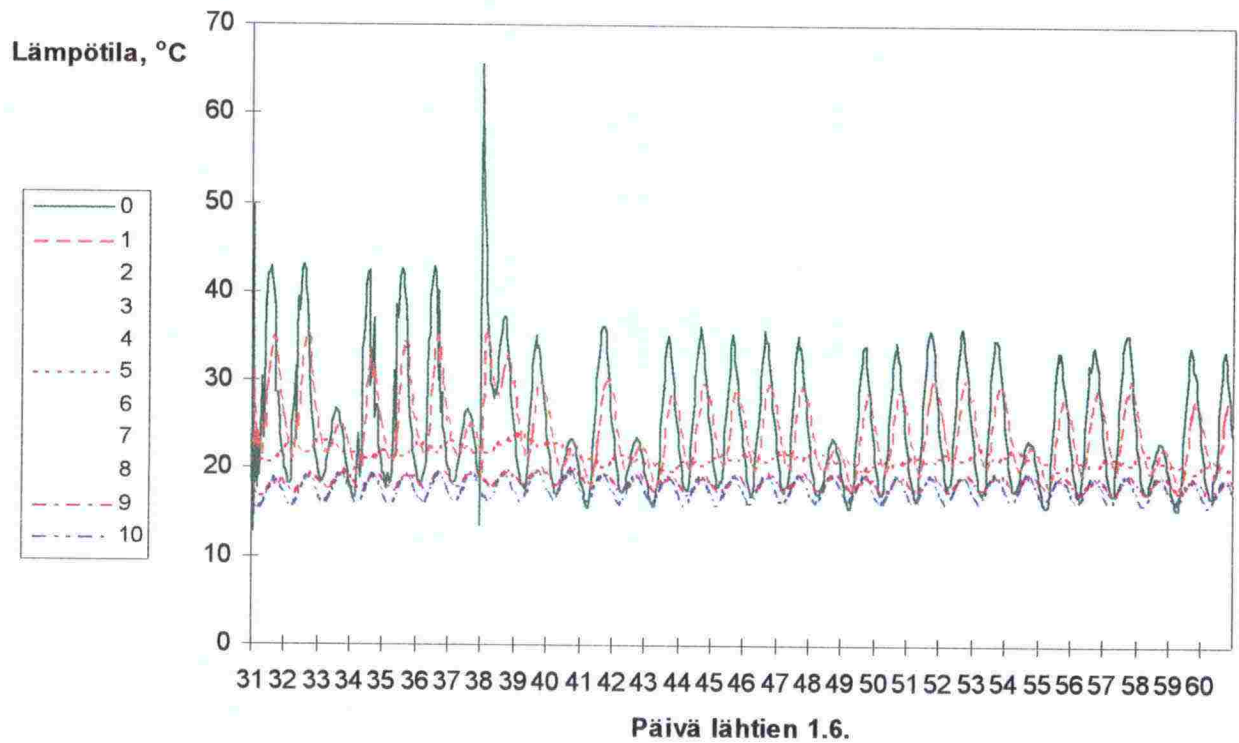


Kuva 8. Laatan lämpötilat valun jälkeen 1.-30.6.

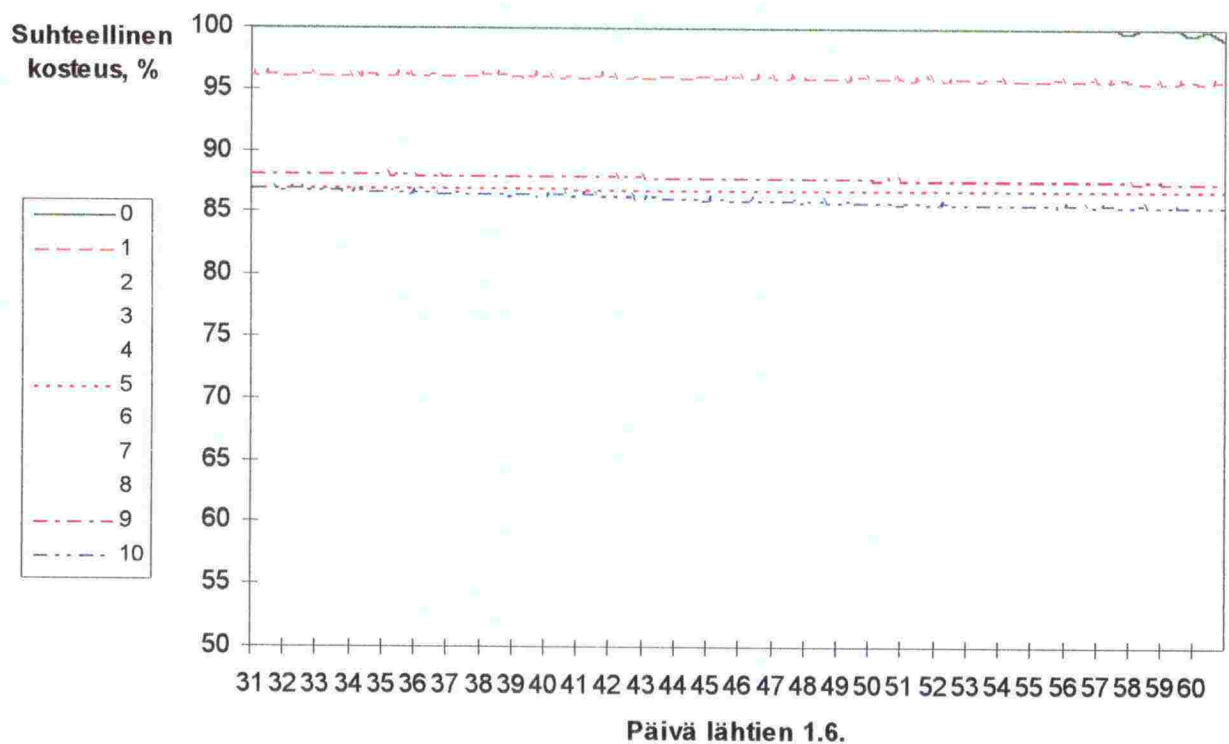


Kuva 9. Suhteelliset kosteudet valun jälkeen 1.- 30.6.





Kuva 10. Lämpötilat eristyksen jälkeen 1.-30.7.



Kuva 11. Suhteelliset kosteudet eristyksen jälkeen 1.-30.7.

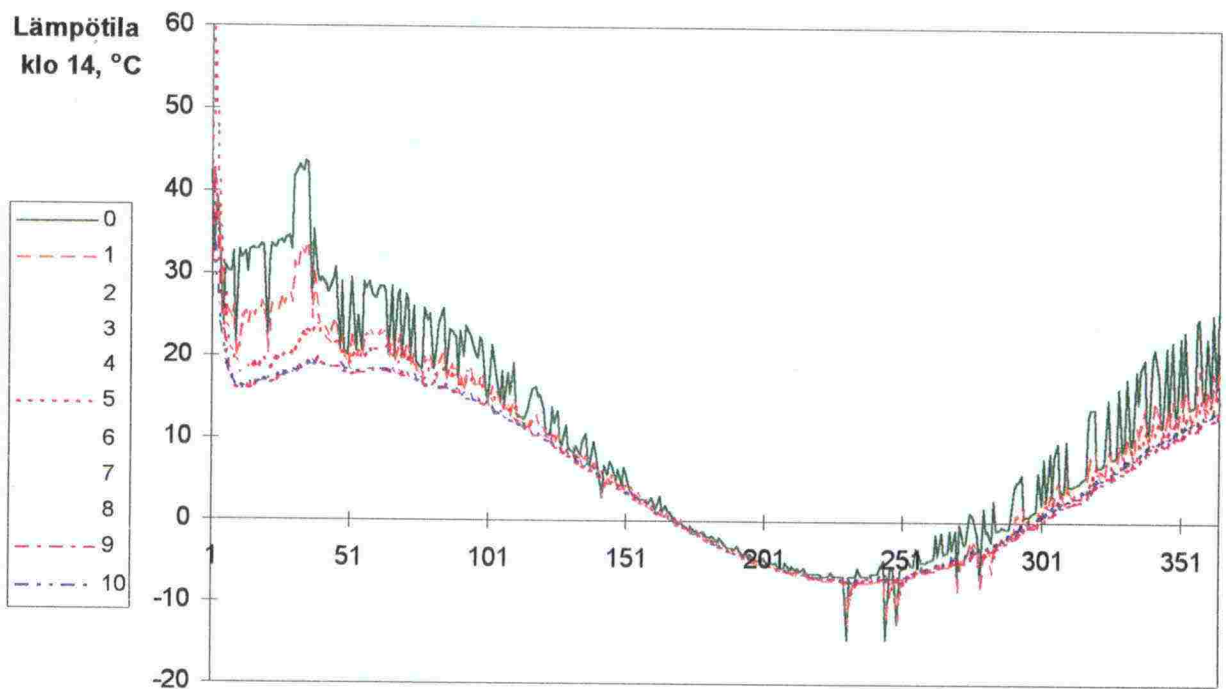
Kuvassa 12 nähdään lämpötilakäyrät lähtien valupäivästä 1. kesäkuuta ja päättyen seuraavan vuoden kesäkuun alkuun. Kuvan aivan vasemmassa laidassa nähdään hydrataatiolämmön aiheuttama lämpötilan nousu, joka tällä aikaskaalalla esitettynä on piikkimäinen. Valuvaiheen jälkeen betonin ollessa edelleen ilman pinnoitteita, maksimilämpötilat ovat suuruusluokkaa 35 °C. Välittömästi eristämisen jälkeen maksimilämpötilat kohoavat lähes 45 °C:een. Asfalttipäälysteen levittämisen jälkeen maksimilämpötilat ovat hieman yli 30 °C.

Syksyä kohti laatan lämpötilat laskevat. Ilman lämpötilassa ja auringonsäteilyssä ei ole enää yhtä suuria vuorokausivaihteluita, jonka johdosta myös laatan lämpötiloissa vuorokausivaihtelut jäävät pieniksi. Keskellä talvea lämpötilaerot laatan ylä- ja alapinnassa ovat pieniä. Laatan yläpinnassa tapahtuu kuitenkin aika-ajoin lämpötilan äkillisiä laskuja. Nämä alaspäin suuntautuvat lämpötilapiikit johtuvat "yöpakkasista" kirkkaina talviöinä. Tai-vaan ollessa pilvetön avaruuden vastasäteily heikkenee niin paljon, että se aiheuttaa eräänlaisen negatiivisen säteilypiikin laatan yläpintaan. Tämän johdosta minimilämpötilat laatan yläpinnassa ovat noin -15 °C, kun ne muu-alla laatasta ja ilman "yöpakkasia" olisivat noin -6 °C.

Kuvassa 13 esitetään vastaavasti suhteellisen kosteuden vaihtelut vuoden aikana. Kuvan vasemmassa reunassa nähdään hydrataation vaikutukset laatan kosteustilanteeseen. Jälkihoitokastelun ja sateiden johdosta laatan yläpinnassa kosteuspitoisuus on aluksi 100 %, mutta laskee eristämisen jälkeen noin 95 %:iin. Talvea kohti kosteuspitoisuus taas hieman nousee, mutta laskee jälleen lämpimämpiä vuodenaikoja kohti mentäessä. Nämä kosteuspitoisuuden vaihtelut johtuvat termisestä kosteudensiirtymisestä ts. kosteus pyrkii siirtymään lämpötilagradientin suuntaan. Kesällä laatan yläpinta on lämpimämpi kuin alapinta, jolloin kosteus siirtyy alaspäin. Talvella yläpinta on päinvastoin kylmempi, jolloin kosteus siirtyy ylöspäin. Pisteessä 2 suhteellinen kosteus on noin 93 %, laatan keskellä ja alapinnassa keskimäärin noin 88 %. Aivan alapinnassa (pisteessä 10) nähdään kuitenkin kausivaihtelua siten, että kesällä suhteellinen kosteus on alhaisempi kuin talvella. Tämä johtuu ilman suhteellisen kosteuden vaihteluista.

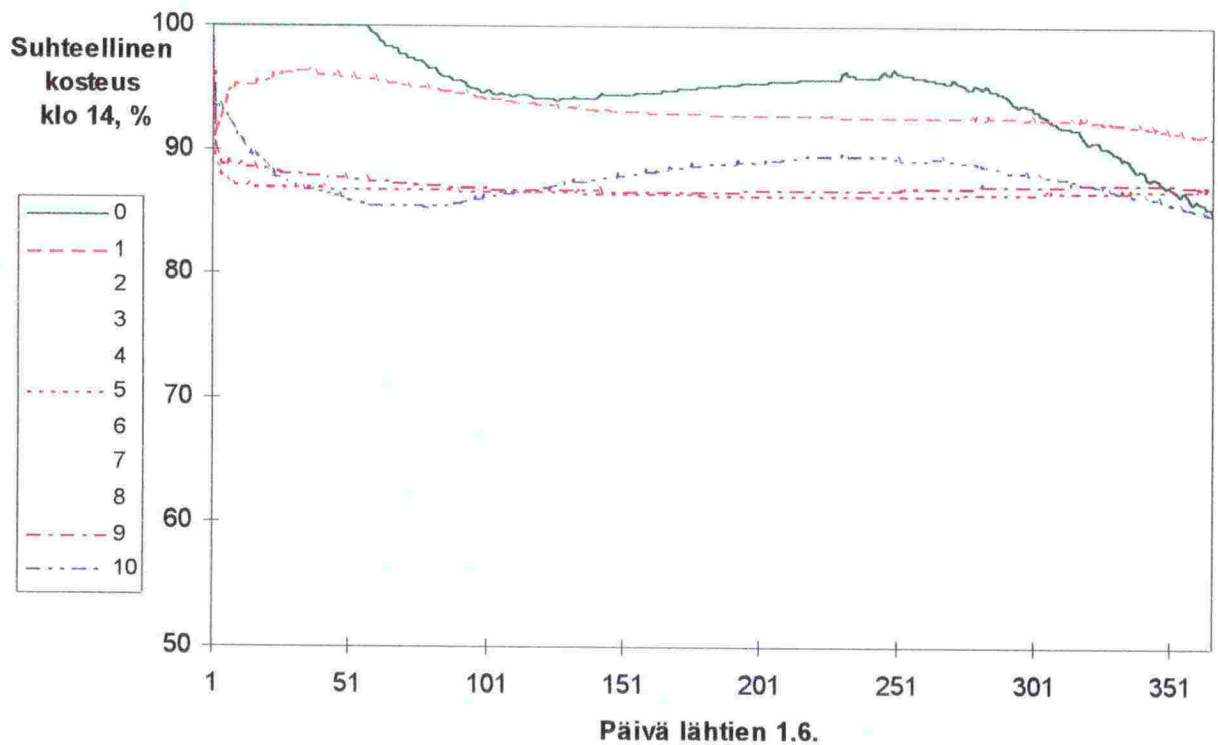
Kuvassa 14 nähdään suhteelliset kosteudet siltakannessa kolmantena vuonna valun jälkeen. Tällöin kosteuspitoisuudet ovat jo tasaantuneet lähes lopulliseen tilaansa. Nyt laatan yläpinnan suhteellinen kosteus on alhaisin vaihdellen kesän 74 %:sta talven 81%:iin. Korkein suhteellinen kosteus on keskellä laattaa, noin 88 - 89 %. Alapinnan suhteellinen kosteus vaihtelee kesän 82 %:sta talven 89 %:iin. Piste 1 asettuu noin 80%:iin ja piste 9 noin 85%:iin.





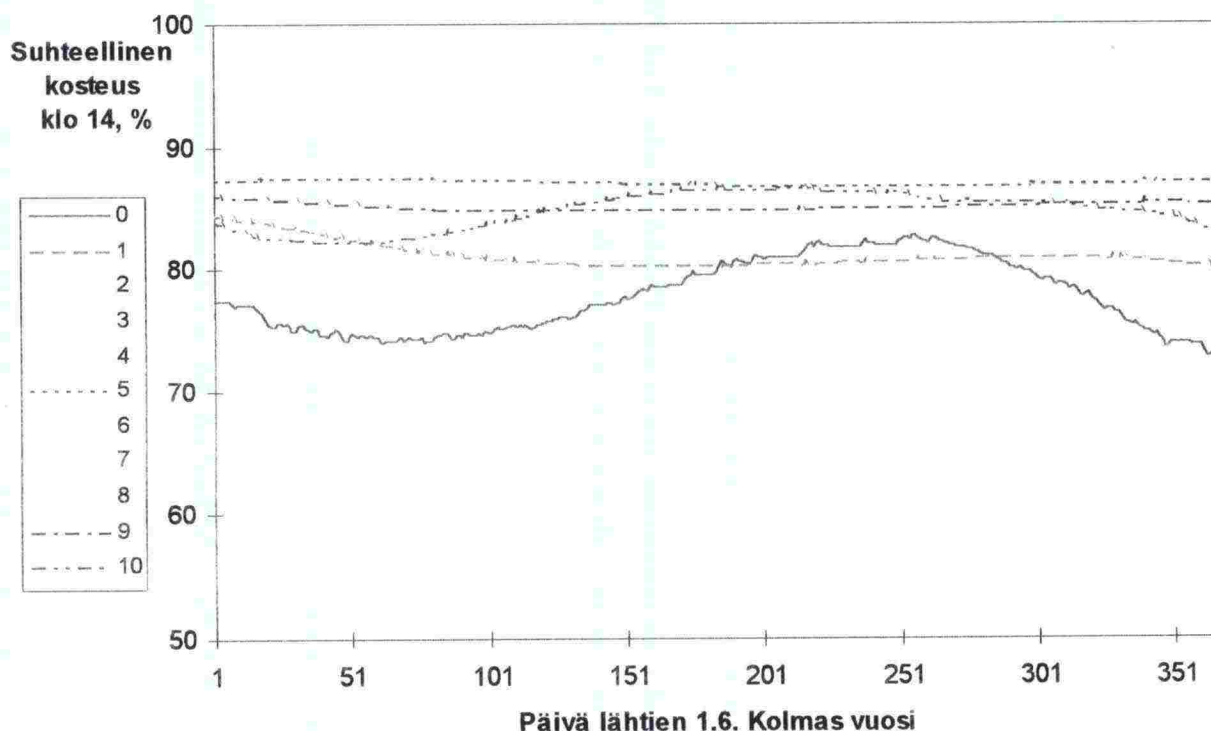
Kuva 12.

Lämpötilat siltakannessa päivittäin klo 14. Ensimmäinen vuosi.



Kuva 13.

Suhteelliset kosteudet siltakannessa päivittäin klo 14. Ensimmäinen vuosi.



Kuva 14. Suhteelliset kosteudet siltakannessa. Kolmas vuosi.

#### Paineet

Seuraavassa tarkastellaan siltakannen eristykseen alle kehittyviä paineita lämpötilan ja kosteuspitoisuuden vaihdellessa normaalin vuorokausi- ja vuodenaikavaihtelun puitteissa. Siltakannen betoniin kehittyviä painelajeja ovat:

1. Kapillaarinen paine
2. Osmoottinen paine
3. Veden jäätymispaine
4. Kaasun paine.

Seuraavassa tarkastellaan kutakin painelajia tarkemmin.

Kapillaarinen paine betonissa johtuu veden kapillaarisesta liikkeestä, mikä puolestaan johtuu pohjimmitaan veden pintajännityksestä ja kyvystä kostuttaa huokosseinämiä. Kapillaarivoimien ansiosta vesi nousee nopeasti betoniin täyttäen kaikki kapillaarihuukokset.

Kapillaarinen paine voi vaikuttaa irrottavasti eristykseen vain, jos betonissa kapillaarisesti liikkuva vesirintama työntää edellään ilmapatsasta, johon ylipaine kehittyy. Tämä on kuitenkin varsin teoreettista, ellei siltalaatta jostain syystä pääse imemään jatkuvasti kosteutta kapillaarisesti alapinnastaan.

Ainoa tilanne, jolloin kapillaariset voimat saattavat vaikuttaa irrottavasti eristykseen, on välittömästi eristämisen jälkeen, jolloin yläpinnan kosteuspitoisuusgradientti tasaantuu eristykseen alla osittain kapillaarisesti. Kuitenkin



tässäkään tilanteessa suurten paineiden kehittyminen ei ole mahdollista, koska ilma ei jää suljettuun tilaan, vaan vesi ja ilma pääsevät helposti vaihtamaan paikkaa.

Osmoottisella paineella tarkoitetaan painetta, joka syntyy veden virtauksesta laimeammasta liuoksesta väkevämpään, kun liuokset on erotettu toisistaan puoliläpäisevällä kalvolla. Puoliläpäisevä kalvo päästää lävitseen veden, muttei liuennutta ainetta. Jos kalvon väkevämmän konsentraation puoli on suljettu, synnyttää kalvon läpi kulkeva vesi paineen. Vesi jatkaa virtaustaan, kunnes syntyvä paine estää sen [34]. Osmoottinen paine voi olla jopa megapascalien luokkaa [35].

Jotta osmoosi voisi kehittyä pinnoitteiden irtoamisen kannalta merkittäväksi, pinnoitteen molemmiin puolin tulee olla konsentraatioero ja pinnoitteen on oltava puoliläpäisevä. Esimerkiksi sementtipohjaiset pinnoitteet ja rososille betonipinnalle levitetyt orgaaniset pinnoitteet muodostavat usein puoliläpäiseviä kalvoja, joiden irtoamisessa osmoosilla voi olla merkittävä osuus. Sen sijaan bitumikermeillä, jotka ovat lähes täysin vettä läpäisemättömiä, ei voi kehittyä vastaavanlaisia paineita.

Jäätymispaineen aiheuttaa betonissa lähinnä kaksi tekijää: 1) hydraulinen paine ja 2) mikroskooppisten jääkiteiden kasvu. Jäätymispaineet voivat irrottaa betonin pinnassa olevan pinnoitteen tai rikkoa betonin.

Hydraulisen paineen teoria lienee vanhin ja tunnetuin pakkasrapautumisen teoria [36]. Siinä betonin turmeltumisen katsotaan tapahtuvan paineen vaikutuksesta, joka syntyy, kun osa huokosvedestä jäätyy ja jäätyessään kasvaa tilavuudeltaan noin 9%. Paineen vaikutuksesta jäätymätön osa huokosvedestä puristuu huokosesta pois ja etsii betonista vapaata tilaa. Jos vapaata tilaa ei löydy, paine kasvaa niin suureksi, että betonin lujuus ylittyy.

Teorian perusteella on ymmärrettävää, että betonin nk. suojahuokosilla, jotka normaalisti ovat ilmatäytteisiä, on suuri merkitys betonin pakkasenkestävyydelle. Mitä tiheämmin näitä huokosia esiintyy betonissa, sitä tehokkaammin hydraulinen paine voi purkautua niihin, jolloin sisäisiä vaurioita ei pääse syntymään.

Mikroskooppisten jäälinsien teorian mukaan pakkasvauriot selittyvät osin betonin kapillaarihuokosiin kehittyvien mikroskooppisten jäälinsien avulla, jotka pyrkivät kasvamaan alijäähtyneessä huokosvedessä [37]. Jäälinsien kasvu johtuu siitä, että kapillaareihin syntyvän jään kemiallinen potentiaali on alhaisempi kuin alijäähtyneen veden potentiaali kaikkein pienimmissä huokosissa, mistä syystä niissä oleva vesi pyrkii siirtymään jääkiteitä kohti ja kasvattamaan jääkiteitä. Tilanteessa, jossa jääkiteiden kasvulle ei löydy riittävästi tilaa, aiheutuu huokosseinämiin niin suuri ylipaine, että betoni rikoontuu.

Ilmahuokosten voidaan selittää parantavan betonin pakkasenkestävyyttä myös jäälinsien kasvuteorian pohjalta. Osittain ilmatäytteisissä huokosissa syntyvä jää voi nimittäin lisätä tilavuuttaan aiheuttamatta betoniin painetta.

Veden kulkeutuminen ilmahuokosiin vähentää jäälinssettä sisältäviin kapillaarihuokosiin kulkeutuvan veden määrää.

Pakkasvaurioiden perusmekanismeja yhdistäväksi teoriaksi on kehitetty nk. kriittisen vedelläkyllästysasteen teoria [38]. Vaikka kriittisen vedelläkyllästysasteen teoriolla on monia yhtymäkohtia edellämainittuihin perusteorioihin, se ei kuitenkaan ole peruslähtökohdiltaan niistä riippuvainen. Sen keskeisenä ajatuksena on ainoastaan se, että betonilla on nk. kriittinen vedelläkyllästysaste, jonka yläpuolella betoni vaurioituu jäätyessään.

Jos betonin kosteuspitoisuus kermin alla on riittävän suuri ja betonissa ei ole riittävästi ilmahuokosia, joihin jäätympaineet voisivat purkautua, voivat jäätympaineet aiheuttaa kermin irtoamisen alustastaan tai alusbetonin rapautumisen. Paineiden kehittyminen voidaan estää pitämällä betoni riittävän kuivana.

Kaasun paine on keskeisin syy eristysten irtoamiseen ja kuplimiseen kesäaikaan. Paineen aiheuttaa eristyksen alla olevan ilman ja vesihöyryn seoksen jaksottainen lämpeneminen. Vaikka kaasun paine on suhteellisen pieni verrattuna eristyksen vaadittuun tartuntaan, jatkuva syklinen rasitus voi irrottaa eristyksen varsinkin, jos tartunta jostain syystä on jäänyt puutteelliseksi.

Kun siltakannen annetaan kuivua ennen sen eristämistä, betonin huokokset täyttyvät osittain ilmalla. Vaikka kuivuminen olisi vähäistäkin, betoniin jää kuitenkin aina ilmaa nk. ilmahuokosiin, jotka normaali-ilmanpaineessa eivät täyty vedellä. Siten eristyksen alla olevassa betonissa on aina enemmän tai vähemmän ilmaa, johon voi kehittyä paineita lämpötilanmuutosten seurauksena. Ko. ilma on yhteydessä betonin huokosissa olevaan veteen, joten se on vesihöyryn suhteen lähes kyllästettyä. Arvioitaessa lämpötilan vaikutuksia kaasun paineeseen tulee näin ollen ottaa huomioon myös vesihöyryn paine. Kokonaispaineen lisäys on lämpötilan kohoamisesta johtuvan kaasun paineen lisäyksen ja vesihöyrynpaineen kasvusta johtuvan paineen lisäyksen summa.

Väliportissa [2] esitetyt painelaskelmat on tehty olettaen, että siltalaatta on niin paksu ja tiivis, että paineet eivät pääse purkautumaan laatan alapinnan kautta. Tämä oletus pitääkin likimain paikkansa, jos betoni on hyvälaatuista ja sen kosteuspitoisuus on suuri. Muita oletuksia olivat:

1. Ilman ja vesihöyryn seos käyttäytyy ideaalikaasun tavoin, jolloin paine on verrannollinen lämpötilaan. (Tämä ei tarkalleen pidä paikkaansa, sillä kaasun esiintyessä yhdessä nesteen kanssa paine-tilavuus-käyrä ei noudata tarkalleen ideaalikaasun lakia.)
2. Huokosissa oleva kaasu on vesihöyryn suhteen kyllästettyä ja vesihöyryn kyllästyspaine noudattaa tunnettua lämpötilalakia. (Jos kapillaarihuokokset eivät ole täynnä vettä, vesihöyryn paine lasketaan kaavasta  $p = \phi p_s$ , missä  $\phi$  on betonin suhteellinen kosteus ja  $p_s$  vesihöyryn kyllästyspaine tietyssä lämpötilassa. Jos suhteellinen kosteus on 90 - 100 %,



kuten yleensä eristyksen alla, tämä ei suuresti vaikuta laskettuun paineeseen.)

3. Ilmahuokosessa oleva ilma ei liukene veteen eikä siinä muunkaan tyyppiä kaasun tai nesteen virtauksia, jotka voisivat muuttaa alkuperäistä huokostilavuutta.

Laskelmien mukaan laatan yläpinnan lämpötilan nousu  $+5^{\circ}\text{C}$ :sta  $+50^{\circ}\text{C}$ :een voi tuottaa noin  $0,03\text{ MPa}$ :n paineen. Tämän suuruusluokan paineet ovat selvästi pienempiä kuin tartuntavaatimus, joka on  $0,4\text{ MPa}$   $+23^{\circ}\text{C}$ :n lämpötilassa, [3]. Toisaalta, jos eristys on irti alustastaan, paine pystyy helposti nostamaan päällysrakenteen ilmaan, sillä  $10\text{ cm}$ :n asfalttikerros aiheuttaa vain noin  $0,002\text{ MPa}$ :n vastapaineen.

Asfalttoinnin jälkeen laatan yläpinnan lämpötila nousee maksimissaan noin  $35^{\circ}\text{C}$ :een, jolloin kaasun paine vastaavalla tavalla laskien on noin  $0,02\text{ MPa}$ .

Jos pintakermin säteilyn absorptiokerrointa pienennetään esimerkiksi käyttäen vaaleaa pintasirotetta, voidaan laatan yläpinnan huippulämpötiloja ennen asfaltointia laskea noin  $15^{\circ}\text{C}$ . Tämä pienentäisi kaasun maksimipainetta noin  $40\%$ .

Ilmakuplaan kehittyvää ylipainetta ei voida suoraan verrata eristyksen tartuntaan. Tämä johtuu kahdesta syystä. Ensiksikin kermin irtoamismekanismi noudattaa murtumismekaniikan sääntöjä eikä siten perustu puhtaasti tartuntalujuuden ja paineen keskinäiseen suhteeseen. Toiseksi kuormitus on syklistä, mikä johtaa väsymisrasitukseen ja vaurion jatkuvaan hitaaseen etenemiseen.

Toistuva kuormitus saa aikaan särökoon kasvun ja sen kautta kriittisen paineen vähittäisen pienenemisen. Syklinen kuormitus voi johtaa myös eräänlaiseen pumppautumisilmiöön, joka saa aikaan kuplan tilavuuden kasvun, [39].

Liikenne vaikuttaa eristyksen irtoamiseen ja kuplan syntymiseen kasvattamalla kuormituspaineita. Ajoneuvot rikkovat helposti kuplan kohdalla koholle nousseen päällysteen ja eristyksen.

### 3.1.3.2 Kosteus- ja lämpötilamittaukset silloilla

Kenttämittausten tulokset kolmelta sillalta esitetään kuvissa 15 - 22. Saman anturin suhteellisen kosteuden (RH) ja lämpötilan käyrät esitetään kuvissa saman värisinä. Tiedot tutkimussiltojen kansien betonointiajankohdista sekä betonimassojen suunnitelman mukaisista ominaisuuksista esitetään taulukossa 9.

Taulukko 9. Tutkimussiltöjen kansien betonointiajankohdat ja betonimassan ominaisuudet.

Silta	littalan rs.	Kasarmintien ylik.s.	Kehä 1/ Tuusulant. rs.
Kannen valupäivä	3-4.10.1995	17.4.1997	26-27.6 1997
Betonin lujuusluokka	K 35-1	K 35-1	K 40-1
Notkeus [sVB]	2-3	2-3	1-2
Ilmamäärä [%] (suunnittelu)	3,5	3,5	3,0
Vesisementtisuhde	0,53	0,51	0,40
Vesisideainesuhde vesi/(sementti+kuona)	0,45	0,46	-

**littalan risteysilta***Siltakannen yläpinta keskellä siltaa*

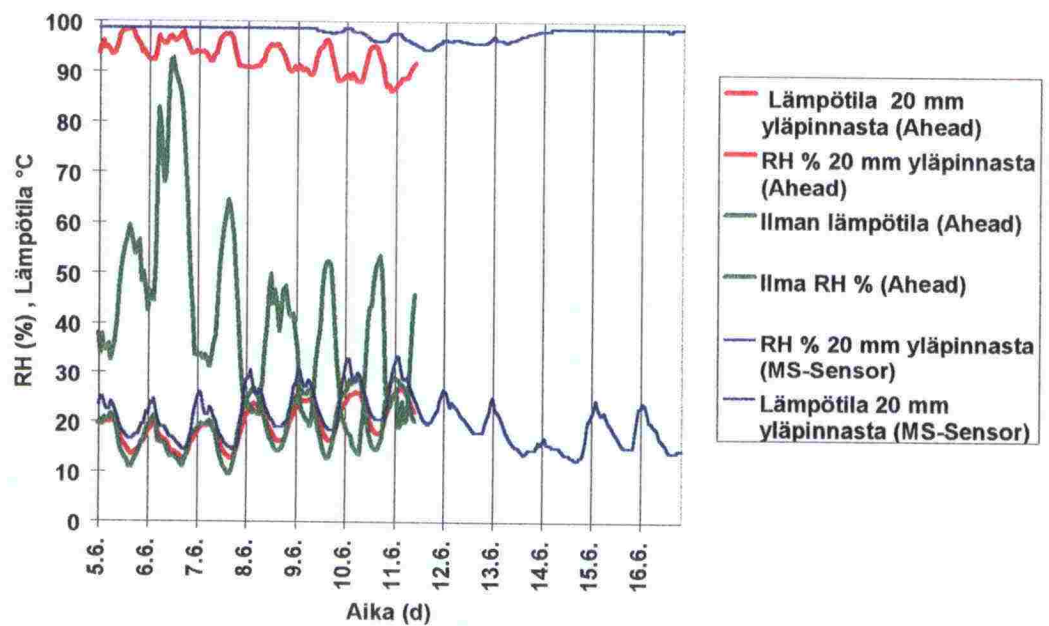
Kuvassa 15 esitetään tiedonkerääjään talletetut mittaustulokset siltakannen yläpinnan keskiosasta aikana 5.6 - 17.6.1996.

MS-anturi sijaitsi 20 mm yläpinnasta ja AHEAD Hygrotemp II-anturi mittasi välillä 20-50 mm yläpinnasta. Anturien valmistajien mukaan kosteusmittausten epätarkkuus on  $\pm 2$  % RH.

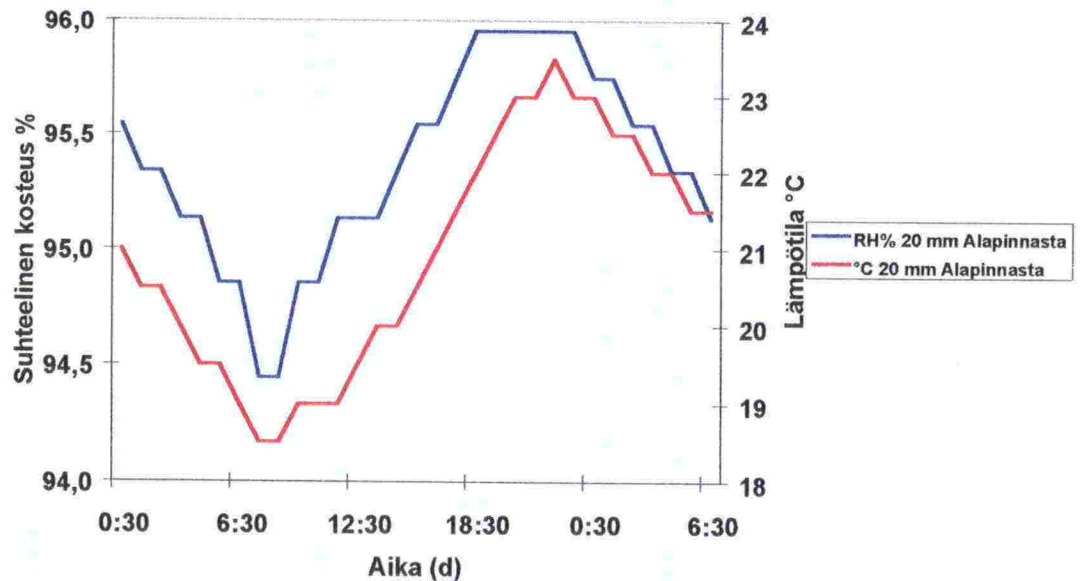
Kuvan 15 mukaan AHEAD-anturin lämpötila-arvot poikkeavat MS-Sensor-anturin vastaavista arvoista. Ero johtuu siitä, että porareikään asennettava AHEAD-anturia pitkin johtuu anturin mittauspäähän lämpöä, mistä seuraa virheellinen mittaustulos. Sen sijaan betonin sisään valettavalla MS-Sensor-anturilla vastaavaa virhettä ei esiinny.

Ilmatilassa suhteellinen kosteus laskee, kun lämpötila nousee. Sen sijaan betonin tasapainokosteus lämpötilan suhteen on sellainen, että suhteellisen kosteuden pitäisi nousta, kun mittauskohdan lämpötila nousee ja laskea, kun mittauskohdan lämpötila laskee, [2], [3]. AHEAD-anturilla betonista mitattava suhteellinen kosteus reagoi lämpötilaan samalla tavalla kuin ilmasta mitattuna ts. päinvastoin kuin em. teorian mukaan pitäisi. MS-Sensor-anturin kosteuskäyrä seuraa lämpötilakäyrää teorian mukaan oikein (kuva 16). Porareikäanturien lämpötilan ja suhteellisen kosteuden mittausrvirhettä voidaan pienentää lämmöneristyksellä. Kuvassa 15 MS-Sensor-anturilla mitattu suhteellisen kosteuden arvo laskee kesäkuun alussa noin 94 %:iin, jonka jälkeen se kääntyy nousuun.





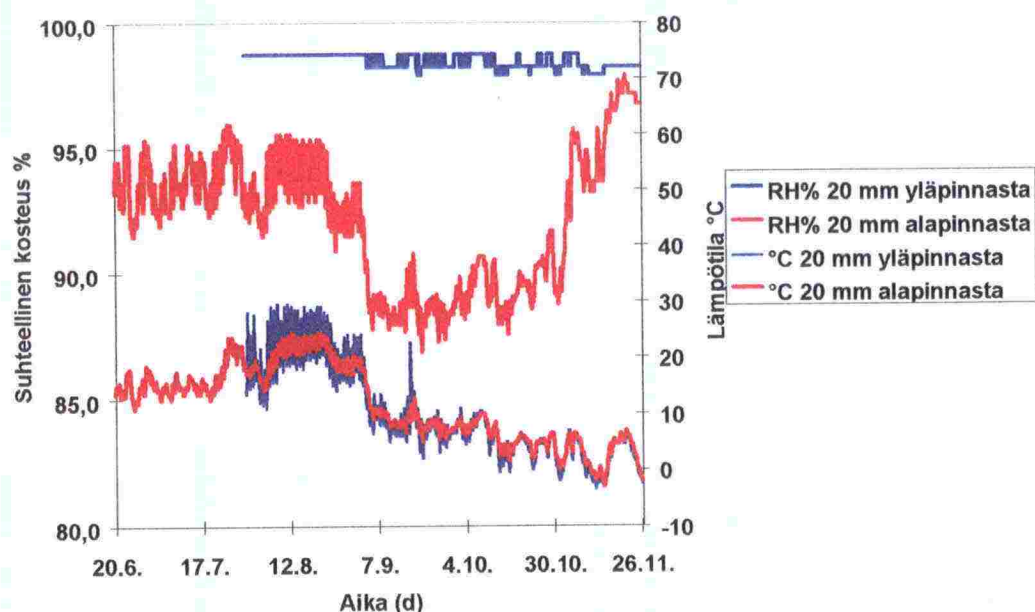
Kuva 15. Iittalan risteys sillan kannen yläpinnan keskiosa 6.6. - 17.6.1996. (Aika-akselin viivakohdilla klo 14.)



Kuva 16. Iittalan risteys sillan reunan alapinta 24.7 klo 0:30 - 25.7.1997 klo 6:30. MS-Sensor-anturin suhteellisen kosteuden käyrä seuraa vuorokautista lämpötilan vaihtelua. Yksityiskohta kuvasta 15.

*Siltakannen reuna*

Kuvassa 17 esitetään sillan reunassa ylä- ja alapinnasta mitatut tulokset ajalla 23.6. - 26.11.1996. Mittaukset tehtiin MS-Sensor-anturilla.



Kuva 17. Sillan reunassa ylä- ja alapintojen mittaustulokset 26.6.-26.11.1996.

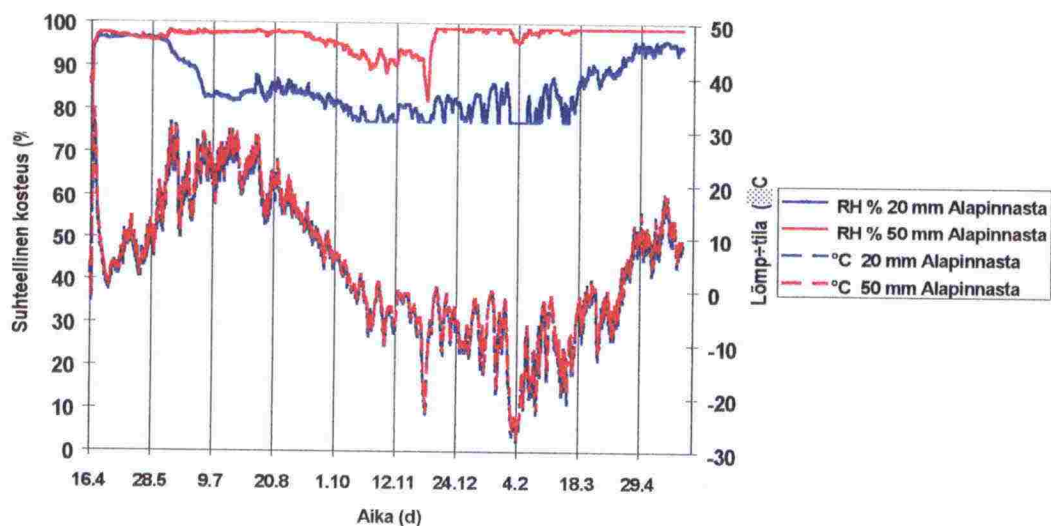
Kuvasta 17 ilmenee, että sillan reunalla siltakannen alapinnassa tapahtui kuivumista elokuussa ja vielä syksyllä. Alapinnan pienin suhteellinen kosteusarvo oli 87 %, lokakuussa suhteellisen kosteuden arvot alkoivat nousta ja marraskuun lopussa suhteellinen kosteus oli yli 97 %. Siltakannen yläpinnassa betonin suhteellinen kosteus oli 99 %. Tämä johtuu siitä, että yläpinta oli pinnoitettu tiiviillä kermillä, joka esti kuivumisen.

**Kasarmintien silta, Oulu***Siltakannen yläpinta keskellä siltaa*

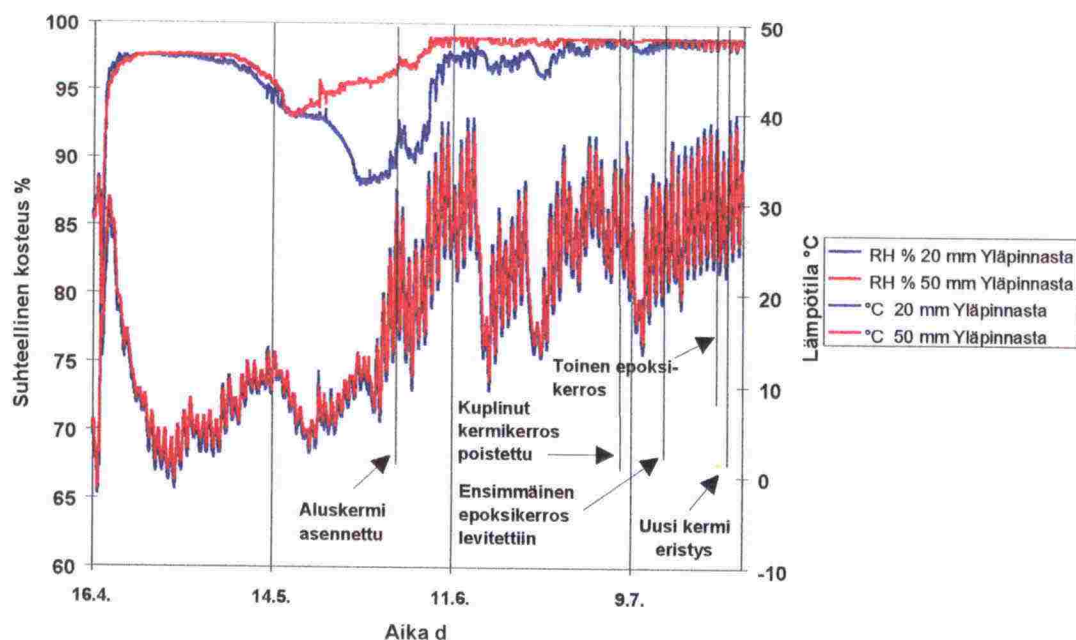
Mittaustulokset esitetään kuvassa 18 siltakannen valuhetkestä marraskuun alkuun (16.4 - 7.11.1997). MS-Sensor-anturit sijoitettiin 20 mm ja 50 mm syvyydelle yläpinnasta. Valun jälkeen siltakannen yläpinta suojattiin sateelta. Heti betonin kovettumisen jälkeen molempien antureiden kosteuskäyrät laskivat. Tämä johtuu betonin itsekuivumisesta (self-desiccation). Hydrataatioreaktioiden vaatima vesi aiheuttaa betonin kuivumisen ilman ulospäin tapahtuvaa kuivumista alhaisilla vesisideainesuhteilla. Vasta noin kuukauden kuluttua suhteellinen kosteus nousee lämpötilan nousun ja myöhemmin vedeneristuksen asentamisen vaikutuksesta.



Kermin kupliminen todettiin 26.6.1997 (eristystyöt aloitettiin 30.5.1997). Kuvassa 19 esitetään mittaustulokset kuplimisen ajalta tarkennettuna.



Kuva 18. Mittaustulokset Kasarmintien siltakannen keskiosan yläpinnasta. Mittausaika 16.4. - 7.11.1997.



Kuva 19. Osa kuvasta 18. Mittaustulokset kuplimisen aikana. Mittausaika 16.4.-26.7.97.

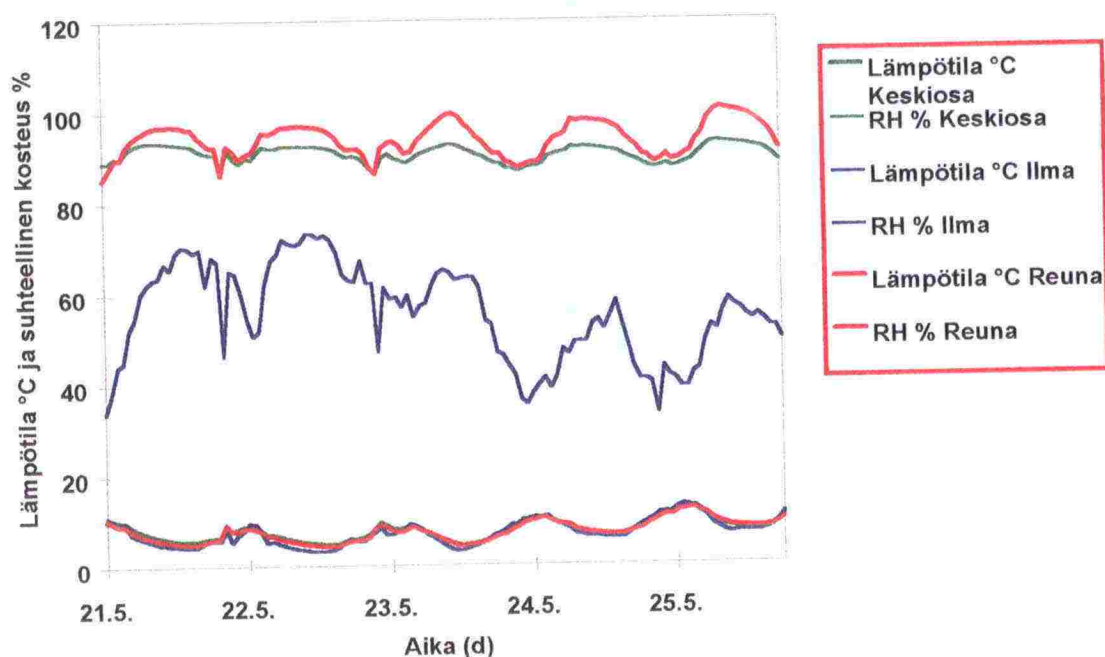
Kuvista 18 ja 19 ilmenee, että toukokuun 20 päivän jälkeen 20 mm:n syvyydellä suhteellinen kosteus jatkaa laskuaan, vaikka lämpötila nousee. Tämä johtuu siitä, että lähellä betonin pintaa betoni pääsee kuivumaan ulospäin. Sen sijaan 50 mm:n syvyydellä betoni ei kuivu, vaan RH-käyrä päinvastoin nousee lämpötilan noustessa.

Kermin asentamisen (2.6.) jälkeen molemmat kosteuskäyrät tekevät pienen nousun ja laskun. 20 mm syvyydellä RH-käyrä nousee 89 %:sta 98 %:iin ja 50 mm syvyydellä 96 %:sta 99 %:iin. Kosteuspitoisuuden kasvu johtuu toisaalta betonikannen kermieristyksen asennuksesta (höyrysulku) ja toisaalta ulkoilman lämpötilan noususta. Ilman kermieristystä olisi 20 mm:n syvyyden RH-käyrä jatkanut laskuaan niinkuin se oli tehnyt ennen eristyksen asennusta.

Tämän jälkeen seurannut kosteuskäyrien lasku johtui siitä, että kuplinut kermi poistettiin ja betonipinta pääsi kuivumaan lyhyen aikaa. Sen jälkeen siltakansi eristettiin uudestaan. Ensiksi suoritettiin epoksinnoitus ja sen jälkeen kermin asennus. Puolet sillasta (pohjoispää) eristettiin 2-kertaisella epoksitiivistyksellä ja 1-kertaisella kermillä, toinen puoli (eteläpää) 3-kertaisella epoksitiivistyksellä ilman kermiä. Uudelleeneristämisen jälkeen suhteellinen kosteus nousi 98 %:n yläpuolelle. Kermin kuplimista ei tämän jälkeen havaittu.

#### *Kosteusmittauskokeita eri antureilla*

littalan sillalla siltakannen yläpinnassa tehtiin kosteusmittauskokeita eri antureilla. Kaksi AHEAD Hygrotemp II-anturia asetettiin 50 mm syvyyteen porattuun reikään. Yksi antureista sijaitsi keskellä siltaa ja toinen sillan reunassa. Lisäksi seurattiin kolmannella AHEAD Hygrotemp II-anturilla ilman suhteellista kosteutta betonipinnan yläpuolella. Mittaustulokset esitetään kuvassa 20.

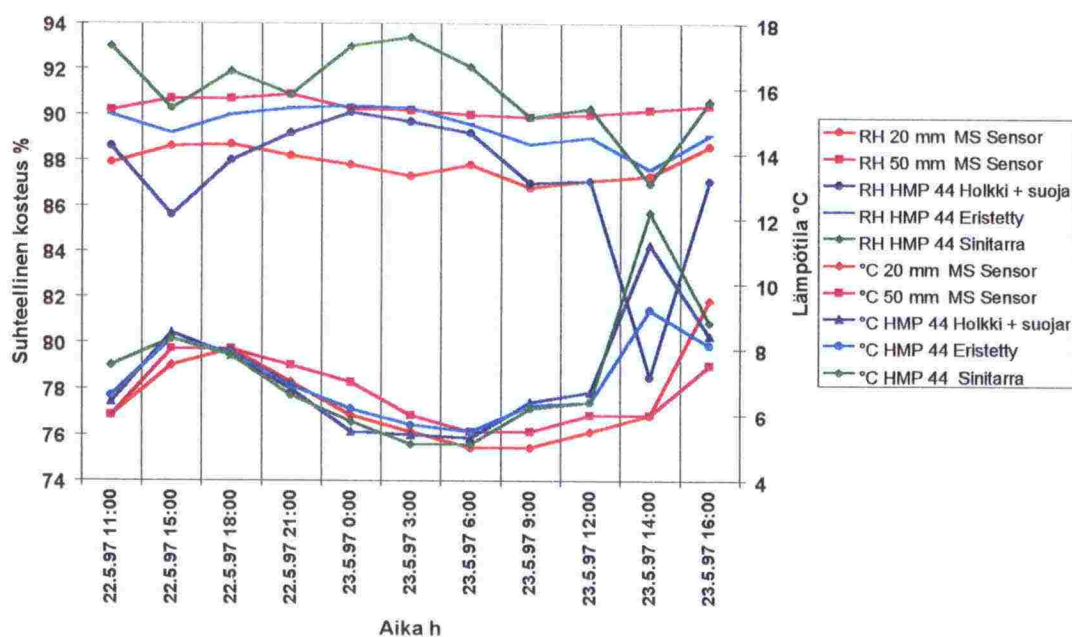


Kuva 20. Suhteellisen kosteuden ja lämpötilan mittaustulokset 21.5.-26.5.1997 AHEAD Hygrotemp II-antureilla. Pystysuorat viivat aika-akselilla klo 16:n kohdalla.



Kuvasta 20 nähdään, että RH-käyrät eivät seuraa lämpötilakäyriä, kuten betonin tasapainokosteuden teorian mukaan pitäisi. Nämä RH-käyrät seurasivat ulkoilman RH-käyrää.

Vaisalan HMP 44-antureilla suoritettiin 24 h seurantamittaus siltakannen yläpinnassa 22.-23.5.1997. Mittausten tarkoituksena oli tutkia suhteellisen kosteuden mittausravon lämpötilaherkkyyttä ja sitä, seuraavatko suhteellisen kosteuden käyrät vastaavia lämpötilakäyriä. Kaksi anturia sijoitettiin betoniin porattuihin 50 mm syviin reikiin siten, että toinen asennettiin valmistajan ohjeiden mukaan asennusholkin ja -suojan kanssa, toinen eristettiin asettamalla reiän yläpuolelle kosteus- ja lämmöneriste (20 mm paksuinen solumuoviputki). Kolmannen HMP 44-anturin asennuksessa ei käytetty asennusholkkia tai -suojaa eikä anturia lämmöneristetty, vaan tiivisteenä käytettiin sinitarraa. Mittaustulokset kirjattiin käsin muistiin Vaisalan näyttölaitteelta 24 h ajalta. Tulokset esitetään kuvassa 21, johon on myös lisätty vastaavan ajankohdan MS-Sensor-antureiden arvot.



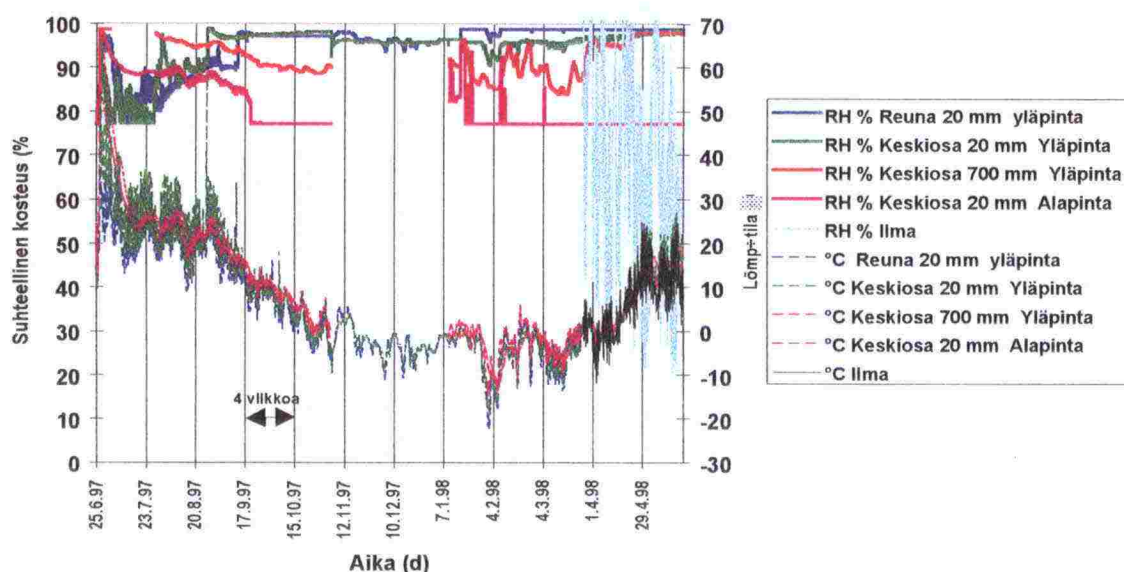
Kuva 21. Kahden HMP 44 anturin mittauskäyrät eri eristyksillä ja vastaavat MS-Sensor antureiden käyrät 22.5. klo 11 - 23.5.1997 klo 16.

Kuvan 21 mukaan HMP 44-anturit osoittavat suurempia vuorokautisia lämpötilan vaihteluja kuin betonin sisään valetut MS-Sensor-anturit. Etenkin iltapäivällä 23.6., jolloin aurinko paistoi siltakannelle, HMP 44-antureiden lämpötilakäyriin muodostui piikki, mitä ei näy MS-Sensor-antureiden lämpötilakäyrissä. MS-Sensor-antureiden mittaustuloksiin verrattuna suurimman lämpötilaeron antoi sinitaralla eristetty HMP-anturi (6,2 °C). Lämpötilan nousu aiheutti välittömästi suhteellisen kosteuden laskun HMP 44-antureilla.

Päinvastoin kuin MS-Sensor-antureiden suhteellisen kosteuden käyrät HMP 44-antureiden RH-käyrät eivät seuraa lämpötilakäyriä eivätkä siten täytä vaatimusta. HMP 44-antureista suurin virhe syntyi asennusholkin ja -suojan kanssa asennetulla anturilla. Pienimmän poikkeaman antoi solumuovilla lämmöneristetty HMP 44-anturi.

### Kehä 1 - Tuusulantien siltatyömaa, Silta 6, valuosa 3

Kehä 1 - Tuusulantien siltatyömaalla aloitettiin seurantamittaukset 26.6.1997. Sillalle asennettiin vain MS-Sensoreita. Mittaustulokset esitetään kuvassa 22 siltakannen valusta toukokuuhun 1998.



Kuva 22. Kehä 1 - Tuusulantien risteyksen siltatyömaan mittaustulokset 26.6.1997 - 22.5.1998.

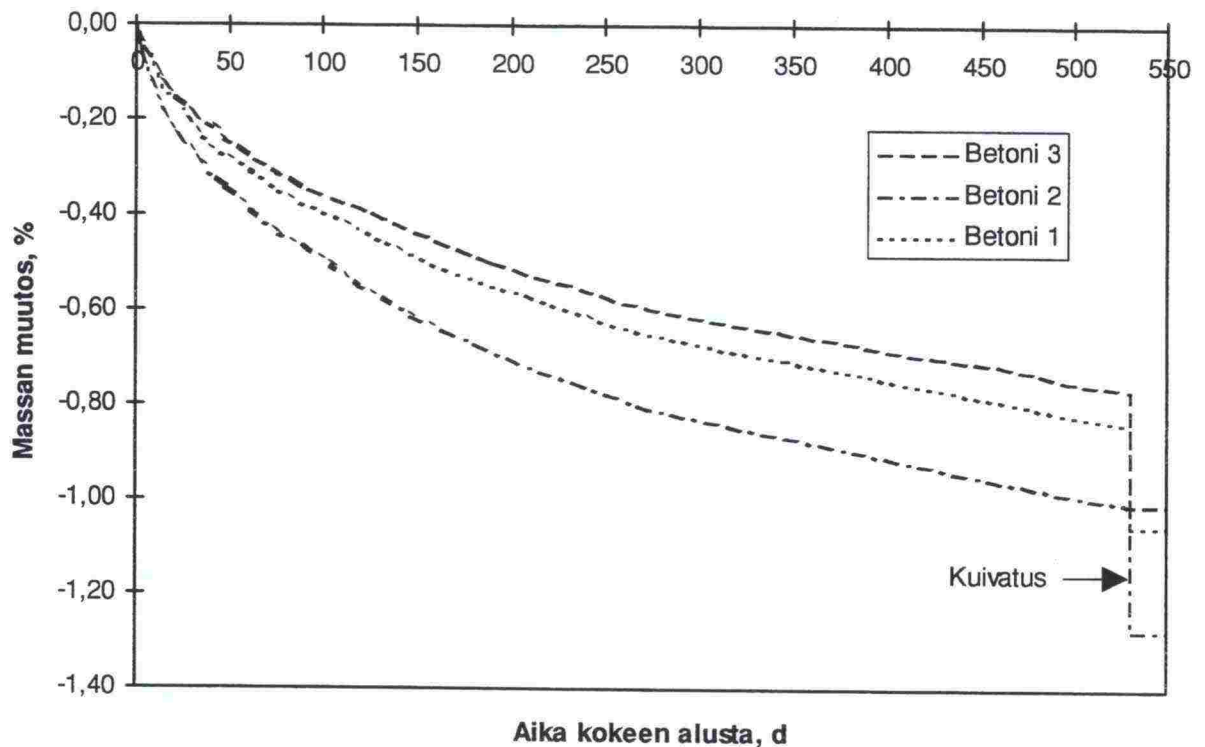
Betonin kovettumisen jälkeen kannen yläpinnan antureilla mitatut suhteelliset kosteudet laskivat arvoon 77 %, jota alempia arvoja tiedonkerääjä ei rekisteröi. Lämpötilan vuorokausivaihtelun takia oli RH kuitenkin osan vuorokautta tämän rajan yläpuolella. Myöhemmin heinäkuussa RH-käyrät alkoivat nousta ja vedeneristuksen asentamisen jälkeen RH oli yli 98 %. Laatan alapinnassa 20 mm syvyydessä suhteellinen kosteus laski betonin kovettumisen jälkeen saavuttaen arvon 77 % syyskuun puolivälissä. Siltakansi eristettiin kumibitumimastiksilla 26.7.1997. Eristämisen jälkeen pinta-antureiden suhteellisen kosteuden arvot olivat korkeat kuten muillakin silloilla.

#### 3.1.3.3 Betonin kuivumisnopeus

Kuivumiskokeessa seurattiin alunperin 100%:n suhteellisessa kosteudessa säilytettyjen kolmen koebetonin massan pientymistä 70 %:n suhteellisessa kosteudessa (Betonien suhteitustiedot taulukossa 7). Tuloksena esitetään koekappaleiden massan muutos ajan funktiona alkutilanteeseen verrattuna (kolmen näytteen keskiarvo), kuva 23.



Koebetonien kuivuminen oli hyvin hidasta. Koekappaleiden massat pienenivät vielä kokeen päätyttyäkin 540 d jälkeen. Betoni 2 kuivui nopeimmin ja betoni 3 hitaimmin. Koetulos osoittaa, että huokostetut betonit kuivuivat huokostamattomia betoneja nopeammin. Massan muutos 540 d jälkeen oli -0,84 % betonilla 1 ja -1,01 % betonilla 2 ja -0,77 % betonilla 3. Lopuksi koekappaleet kuivattiin 60 °C:n lämpötilassa, koska liimatut kumieristeet eivät olisi kestäneet 105 °C:n lämpötilaa.



Kuva 23. Massan suhteellinen pientyminen 540 d aikana (70% RH).

### 3.1.3.4 Eristysolosuhteet

SYL 6:n ohjeiden mukaan määräytyvä sallitun eristystyöajan pituus kolmella paikkakunnalla esitetään graafisesti kuvissa 24 - 29. Sallittu eristystyöaika esitetään prosentteina koko vuorokaudesta (24 h). Sademäärän perusteella tulokset on jaoteltu kahteen vaihtoehtoon (a ja b).

Kaikki ehdot yhteensä huomioon ottaen sallittua eristystyöaikaa oli testivuoden 1979 huhti-lokakuussa sademäärävaihtoehdon a mukaan Helsingissä keskimäärin 17 % (vaihtoehdossa b 20 %), Jyväskylässä 13 % (vaihtoehdossa b 19 %) ja Sodankylässä 9 % (vaihtoehdossa b 16 %).

Ulkoilman lämpötilaa ja suhteellista kosteutta koskevien ehtojen täytyminen on melko hyvin ennustettavissa kuten myös pinnan lämpötilaa koskeva ehto suhteessa kastepistelämpötilaan. Ulkoilman lämpötilaehto ( $T < 5\text{ °C}$ ) tulee rajoittavaksi lähinnä huhtikuussa ja lokakuussa. Tosin maantieteellisellä sijainnilla on tässä suhteessa merkitystä. Sodankylässä ainoastaan heinäkuussa lämpötilavaatimus täyttyi 100-prosenttisesti. Tutkimuksen tekemisen jälkeen voimaan tullessa SYL 6:ssa

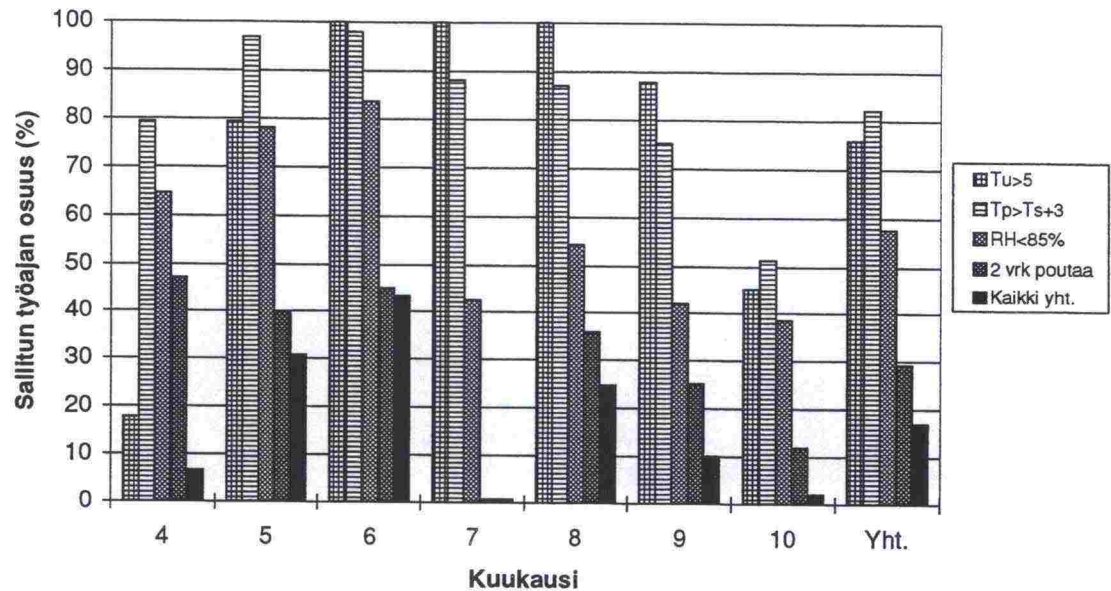
lämpötilavaatimus  $\geq +5$  °C asetetaan eristysalustan pinnalle ilman lämpötilan asemasta ja tämä lyhentää edelleen eristystyöaikaa viileinä kuukausina.

Suhteellisen kosteuden vaatimus ( $RH > 85$  %) vähentää sallittavaa työaikaa kaikkina kuukausina, mutta on syksyllä määräävämpi kuin keväällä. Yleensä pinnan lämpötilaa koskeva vaatimus on saman suuntainen suhteellisen kosteuden vaatimuksen kanssa, mutta suhteellisen kosteuden vaatimus leikkaa enemmän työaikaa.

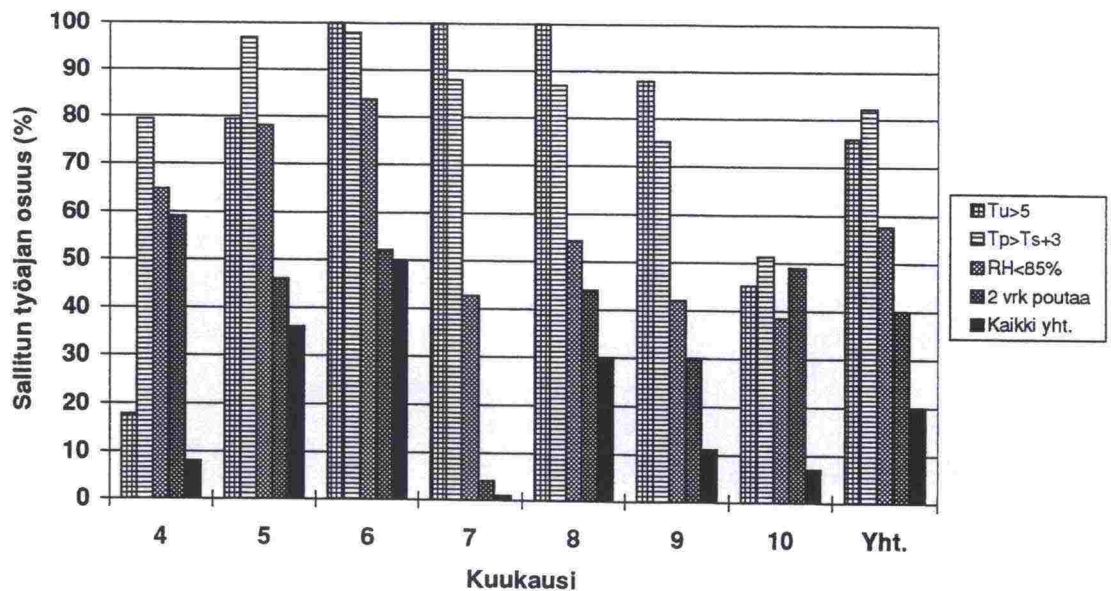
Jos työn estävänä sademääränä pidettiin 5 mm nollan asemasta, kasvoi kaikkien ehtojen perusteella määräytyvä kokonaistyöaika huhti-lokakuussa paikkakunnasta riippuen 20 - 80 %. Eniten työaikaa hukkaantuu sateen jälkeistä kahden vuorokauden yhtäjaksoista poutaa koskevan vaatimuksen johdosta. Syyspuolella yleensä sataa eniten, joten eristystyöaikaa menetetään enemmän syksyllä kuin keväällä. Kuitenkin keskikesälläkin saattaa esiintyä pitkiä sadekausia, jolloin kahden vuorokauden pituiset poutajaksot ovat harvinaisia. Esimerkiksi Helsingissä ei esiintynyt tutkimusvuoden heinäkuussa juuri lainkaan SYL:n vaatimukset täyttäviä olosuhteita sateiden johdosta. Touko- ja kesäkuu olivat Helsingissä ja Jyväskylässä sääolosuhteiltaan otollisempaa aikaa eristystöille verrattuna esim. heinäkuuhun.

SYL:n vaatimusten mukaan sallittua eristystyöaikaa oli tutkimuspaikkakunnilla kahden "parhaan" kuukauden aikana 6 - 12 h/vrk, jos sademääräraja oli 5 mm. Nollasademäärävaihtoehdossa kahden sääolosuhteiltaan edullisimman kuukauden päivittäinen työaika jäisi 5 - 10 tuntiin paikkakunnasta riippuen.

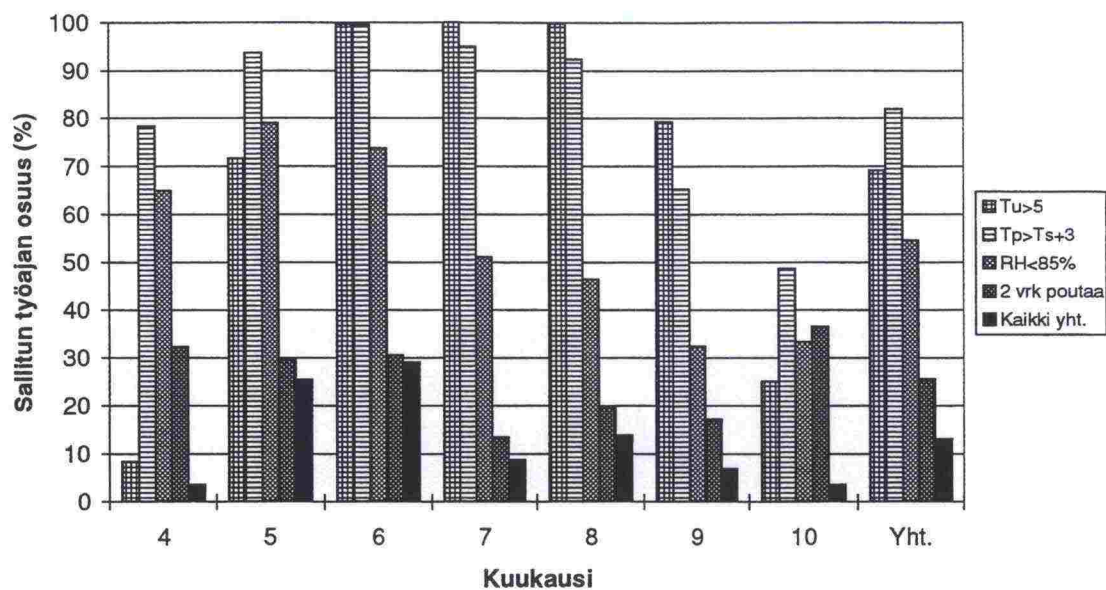




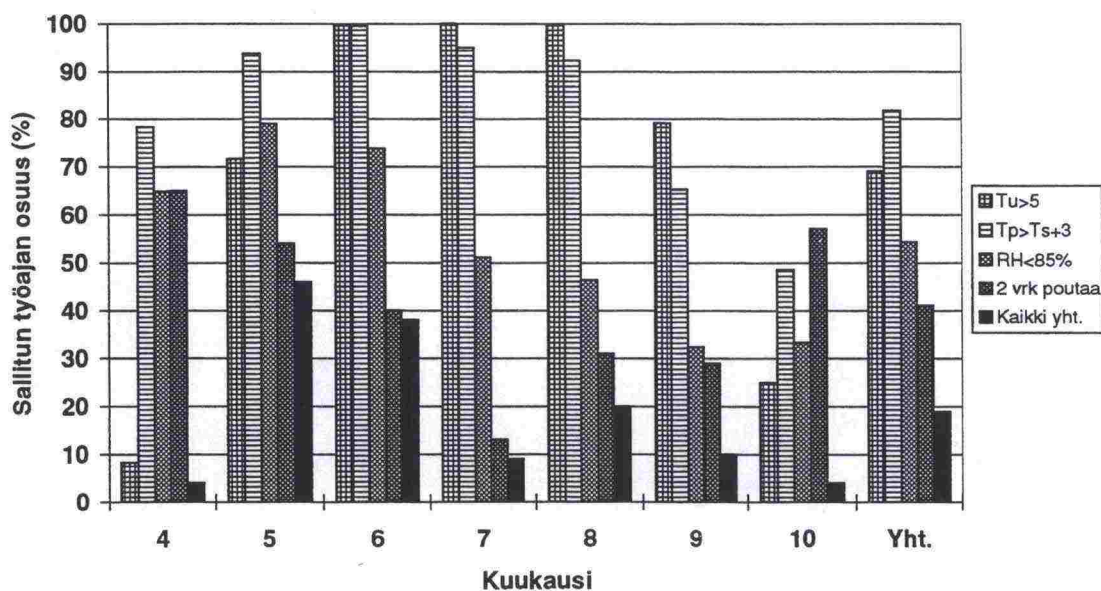
Kuva 24. Sääehtojen täyttyminen Helsingissä v. 1979, vaihtoehto a (sade 0 mm).



Kuva 25. Sääehtojen täyttyminen Helsingissä v. 1979, vaihtoehto b (sade enint. 5 mm/ 12 h).

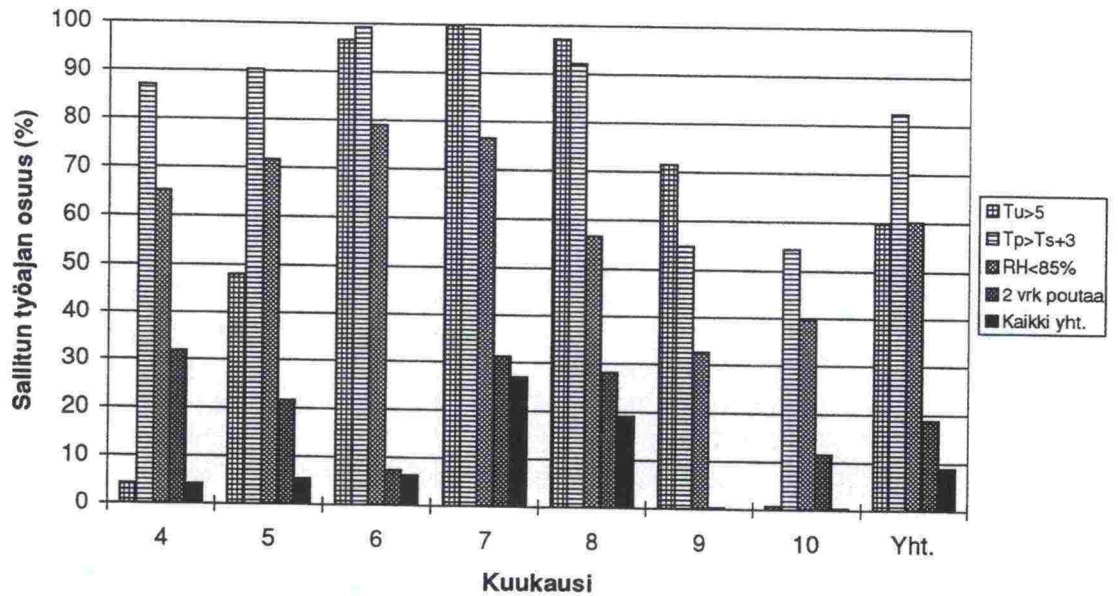


Kuva 26. Sääehtojen täyttyminen Jyväskylässä v. 1979, vaihtoehto a (sade 0 mm).

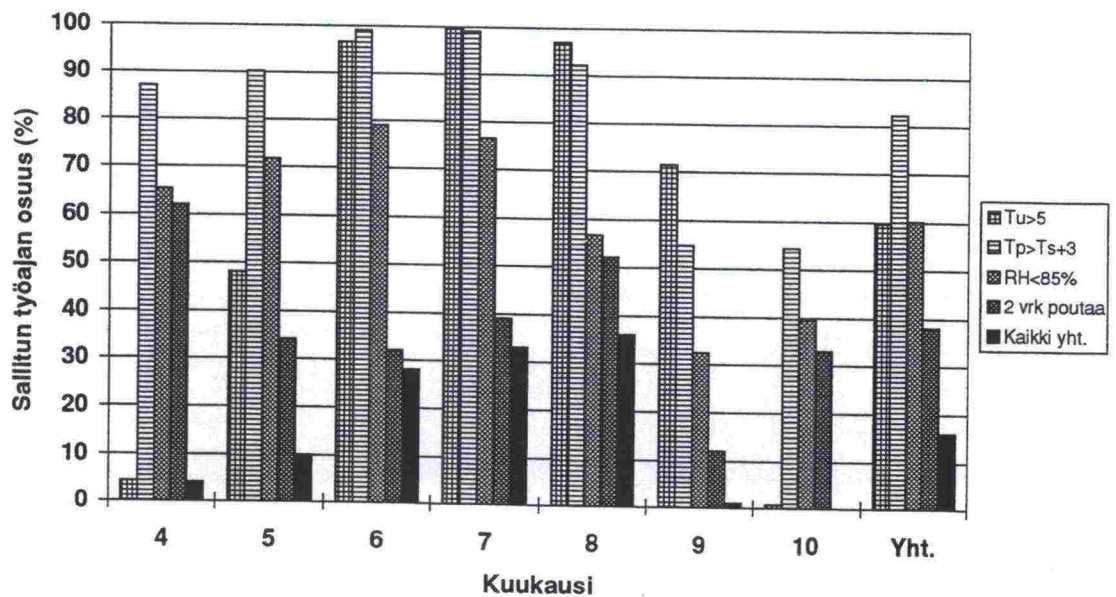


Kuva 27. Sääehtojen täyttyminen Jyväskylässä v. 1979, vaihtoehto b (sade enint. 5 mm/ 12 h).





Kuva 28. Sääehtojen täyttyminen Sodankylässä v. 1979, vaihtoehto a (sade 0 mm).



Kuva 29. Sääehtojen täyttyminen Sodankylässä v. 1979, vaihtoehto b (sade enint. 5 mm/12 h).

## 3.2 Työmenetelmätutkimukset

### 3.2.1 Yleistä

Oikeilla työmenetelmillä ja ammattitaitoisilla työntekijöillä on suuri vaikutus työn laatuun. Parempiin työmenetelmiin siirtyminen aiheuttaa usein lyhyellä tähtämellä lisäkustannuksia, jotka saattavat estää niiden käyttöönoton, vaikka ne pitemmällä aikavälillä tuottaisivat huomattavasti suuremmat säästöt.

Työmenetelmätutkimusten tavoitteena oli selvittää seuraavien menetelmien vaikutus eristysolosuhteisiin tai eristystyön laatuun ja erityisesti kuplimiseen:

- eristysalustan jälkihoito (vesikastelu/ jälkihoitoaine)
- pinnan puhdistus (sinkopuhdistus/ tai hiekkapuhallus/puhdistamaton)
- eristysalustan kuivaus (nestekaasupoltin/ lämpösäteilijä/ kuumennuspin-tauslaite)
- sääsuojahallin käyttö
- eristyksen asennusmenetelmät.

### 3.2.2 Aineisto ja tutkimusmenetelmät

#### 3.2.2.1 Eristysalustan jälkihoito ja pinnan puhdistus

Oulun tiepiirin Kasarmintien ylikulkusillalle (vt 4) valmisteltiin koealueet, joista osa hoidettiin kostealla jälkihoidolla (vesi+muovi) ja osa parafiinipohjaisella jälkihoitoaineella. Molemmiin tavoin jälkihoidetuille sillan osille muodostettiin koealueet, joissa käytettiin eri puhdistusmenetelmiä (sinkopuhdistus, hiekkapuhallus, puhdistamaton). Koealueet on esitetty liitteessä 1. Koko siltakansi eristettiin samalla SYL:n mukaisella kermieristysrakenteella.

Kansibetonin suhteellinen kosteus tutkittiin sekä jatkuvatoimisena mittauksena että poranreikämittauksena. Kermin tartunta mitattiin eri tavoin käsitellyillä betonipinnoilla (6 koealuetta). Koealueilta otettiin betonin pintaosasta poranäytteitä, joista tutkittiin betonin pinnan laatu ja ohuthietutkimuksella mikrorakenne.

#### 3.2.2.2 Sääsuojahallitutkimus

Sääsuojahallitutkimus tehtiin vt 3:n työmaan tieosalla Rättö-Konho sijaitsevalla 2-aukkoisella Patrun risteys sillalla (S820). Silta on jännitetty betoninen laattapalkkisilta, jonka kannen pituus on noin 65,4 m ja hyötyleveys noin 10,5 m. Silta on kaarteessa ja kannella on yksipuolinen, noin 5 % sivukaltevuus.

Ennen eristystyötä osa sillasta katettiin sääsuojahallilla ja osaa ei katettu. Sääsuojahalli oli molemmista päistä avoin, noin 30 m pitkä pressuilla peitetty teltta. Sääsuojahallin järjestämiseen ja pystytykseen liittyvät järjestelyt hoiti siltaurakoitsija.

Patrun sillan koealueet ja eristysrakenteet on esitetty liitteessä 2. Kaikille koealueille tehtiin kaksinkertainen kumibitumikermieristys Katepalin kermeillä. Yhdellä koealueella aluskermi oli paineentasauskermi K-TMS 170/4200, toisella la-



sikuitukangastukikerroksen sisältävä kermi K-ML 200/4200 ja muilla alueilla liimattava K-MS 170/3000 tai hitsattava K-MS 170/4200. Eri koealueilla aluskermin alle tuli esikäsittelyaineeksi kumibitumiliuos KBL 20/100 tai epoksitiivistys (epoksi Ergoflex Dur 500S).

Hitsaamalla asennetut K-MS- ja K-TMS-kermit olivat v. 1996 TIEL:n käyttöluokkaan 2 hyväksyttyjä Katepalin kermejä. Liimaamalla asennetut K-MS-kermit ja lasikangastukikerroskermi olivat Katepalin muita kermejä.

### 3.2.2.3 Betonipinnan kuivaaminen

#### Laboratoriokokeet

Yleisimmin eristystyömailla käytetään pinnan kuivaamiseen käsikäyttöistä nestekaasuliekkiä. Menetelmä oli aiemmin kielletty TIEL:n siltatyömailla, koska nestekaasun palamistuotteena syntyvän vesihöyryn epäiltiin tuovan pintaan kosteutta. Laajojen siltakansien kuivaukseen teholtaan riittäviä nestekaasukuumentimia olisi saatavissa asfalttityömailta. Esteenä niiden käytölle on ollut mm. se, ettei niiden mahdollisista haitoista (ylikuumennusriski) ole ollut riittävää tietoa.

Laboratoriokokeiden tarkoituksena oli selvittää työmaalle soveltuvien betonipinnan kuivausmenetelmien tehokkuutta ja käyttökelpoisuutta. Kuivaukseen kokeiltiin kahta eri menetelmää.

#### a) Säteilykuivaus, nestekaasutoiminen lämpösäteilijä

- Suurin teho 11000 kcal
- Lämpösäteilijä ripustettiin 70 cm laatan yläpuolelle
- Lämmitysaika 40 min. Lämmitystehon valintakytkin pidettiin asennossa 6 noin 18 min ajan ja asennossa 7 noin 22 min ajan.

#### b) Liekkikuivaus, nestekaasupoltin (toho)

- liekillä kuumennettiin laatan yläpintaa 1 min 40 sek.

Laboratoriokoetta varten valettiin kahdella betonisuhteituksella, molemmilla kaksi betonilaattaa (koko 300\*300\* 50 mm<sup>3</sup>). Betonit olivat samoja kuin edellä kuivumiskokeen yhteydessä käytetyt betonit 1 ja 3 (taulukko 7).

Betonilaattoja säilytettiin ritilän päällä ilmassa suljetussa astiassa, jonka pohjalla oli vettä (astian ilmasta mitattu kosteus RH 97%), kunnes niiden kosteus ei enää muuttunut.

Kuivauskoetta edeltävänä päivänä upotettiin yksi laatta molemmista valueristä 24 tunniksi veteen. Ennen kuivauskoetta niiden annettiin kuivua huoneilmassa pintakuiviksi 3 h ajan. Kuivauskokeen aikana laatat olivat laboratoriovaa'an päällä.

Molemmilla menetelmillä kuivattiin yhtä laattaa, jota oli säilytetty kosteassa ilmassa (RH97%) suljetussa astiassa ja toista, jota oli kasteltu vedessä. Betoni-koostumuksen 1 mukaiset kaksi laattaa kuivattiin säteilylämmittimellä ja betoni-koostumuksen 2 mukaiset kaksi laattaa kuivattiin liekillä.

Betonipinnan mahdolliset vauriot tutkittiin ohuthietutkimuksella. Ohuthieet valmistettiin edellä mainituista kuivauskuumennuskokeessa olleista betonilaatoista. Kolmen laatan nurkkaan oli merkitty 100x100 mm<sup>2</sup> kokoinen neliö, jonka päällä kuivauskuumennuksen aikana oli ollut vuorivillapala. Vuorivillan alta ei betonilaattaa kuumennettu ja näiltä kohdin valmistetut ohuthieet olivat vertailunäytteitä.

#### Työmaakokeilu

Työmaakokeilussa selvitettiin asfaltin kuumennuspintaustaitteen vaikutus siltakannen betonin kuivumiseen ja aiheuttaako laite betonille pintavaurioita.

Työmaakokeilu tehtiin Seutulan lentoaseman lähtevän liikenteen ramppisillalla marraskuun lopulla v. 1997. Betonikansi oli kuivausajankohtana noin 5 viikon ikäinen. Ennen kuivauksen aloitusta poistettiin noin kaksi cm paksu lumikerros sillan kannelta harjaustraktorilla ja reunapalkin vierustoilta paineilmalla.

Lämmityslaitte oli nestekaasutoiminen lämpösäteilijä, joka oli asennettu telikuorma-auton puoliperävaunuun. Perävaunun akselin molemmin puolin oli kuumennuselementtikenttä, joiden kummankin koko oli 6 m\*4,6 m. Lämmityslaitteen maksimiteho oli 4800 kW. Ajoneuvoyhdistelmän vetoautossa oli suuri (noin 8 m<sup>3</sup>) nestekaasusäiliö. Kuumennuspintaustaitetta käytti kahden miehen ryhmä, toinen mies ohjasi autoa ja toinen säätö lämmitystä, (kuva 30).

Kuumennustehoon vaikuttavat kuumennuselementtien etäisyys siltakannesta, lämmitykseen kytkettyjen elementtien määrä, kaasunsyöttövirtauksen säätö ja ajonopeus. Kuumennustehon säätö kuumennuslaitteen vieressä kulkeva mies käsisäädöllä pinnan kuivumisen mukaan.

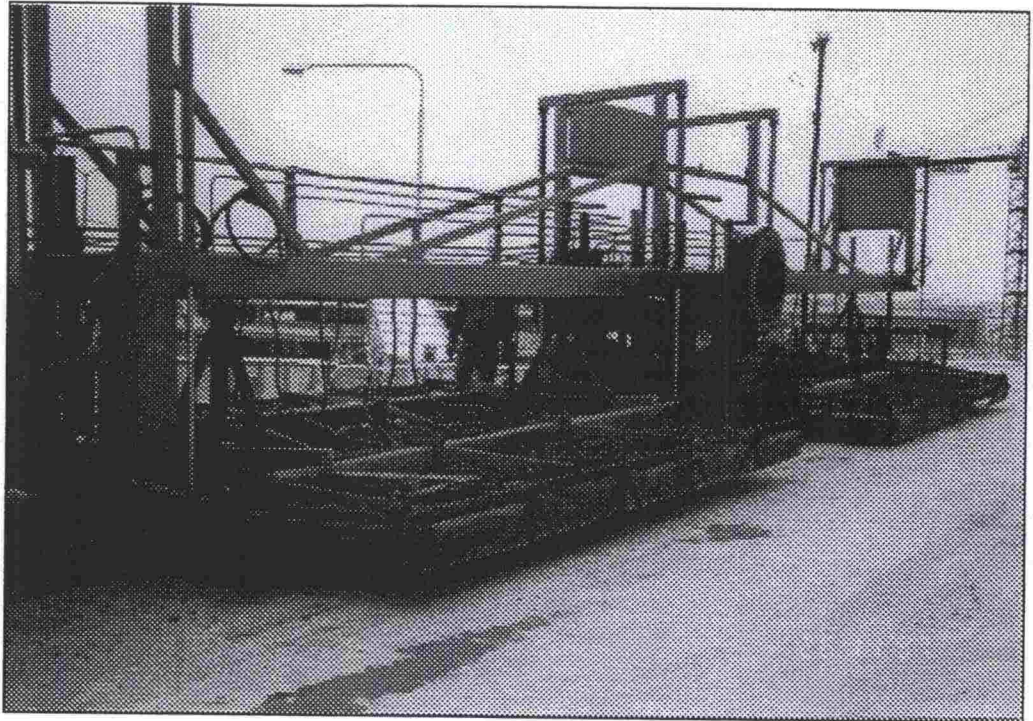
Kuorma-auto hinasi ja työnsi kuumennuslaitetta edestakaisin siltakannella. Ylityskertojen määrä valittiin silmämääräisesti pinnan kuivumisen mukaan. Kuumennuksen loppuvaiheessa mitattu betonin pintalämpötila oli noin +80 °C heti kuumennuslaitteen ylityksen jälkeen noin 1 m etäisyydellä laitteesta. Ilman lämpötila oli tällöin -1,7 °C (kello 14). Sää oli kuivauksen aikana pilvinen. Iltapäivällä oli hyvin vähäistä lumisadetta.

Kuivauksen jälkeen sillan reunapalkkien sisäreunat, vierustat ja yläpinnat siiveltiin kumibitumiliuoksella. Siltakannen eristysmateriaali oli kumibitumimastiksi ja reunapalkkien kumibitumisively. Eristystöitä ei ehditty tehdä samana päivänä. Seuraavana päivänä siltakannen pinta lämmitettiin ja kuivattiin uudelleen ja eristettiin sen jälkeen kumibitumimastiksilla.

Siltakannesta otettiin betonin absoluuttisen kosteuden mittausta sekä ohuthiekoetta varten yhteensä 8 poranäytettä (D= 75 mm).

Betonin mahdollisia vaurioita tutkittiin ennen kuumennusta ja sen jälkeen otetuista poranäytteistä silmämääräisesti ja mikrorakennetutkimuksen avulla. Mikrorakennetutkimusta varten näytteistä valmistettiin yläpinnasta sisäänpäin ohuthieet, jotka tutkittiin polarisaatio- ja fluoresenssimikroskoopilla.





Kuva 30. Siltakannen kuivauksessa käytetty laite.

#### 3.2.2.4 Kermien asennusmenetelmätutkimus

Kermien asennusmenetelmiä tutkittiin Kyrölän ylikulkukäytävän sillalla Järvenpäässä. Sillan kansi oli betonoitu noin 4 viikkoa ennen aluskermin asennusta. Jälkihoitoaine oli Curing 101. Eristysalustaa ei oltu hiekkapuhallettu. Kumibitumiliuoksella pohjustetun betonipinnan makrokarkeus oli viiden mittauksen keskiarvona 0,48 mm (vaihteluväli 0,37-0,68 mm). Betonin pinnassa oli kaarevia, lievästi porrastuneita hierron jälkiä.

Siltakannen eristetty pinta-ala on noin 81 m<sup>2</sup>. Eristysrakenne, joka on hyväksytty Tielaitoksen käyttöluokkaan 2, sisälsi seuraavat kerrokset:

- kumibitumiliuos Katepal KBL 20/100
- aluskermi Katepal K-MS 170/4200 hits.
- pintakermi Katepal K-PS 170 5500 hits.

Reunapalkin sisäreuna ja kannen liittymäkohta siveltiin kumibitumilla Katepal Tiemassa (KB100). Kumibitumi sulatettiin Grün 250 padassa, jossa oli vakiovarusteena termostaatti ja lisävarusteena sekoitin.

Eristysurakoitsija asensi sillalle aluskermin 1.10.97 aamupäivällä viileällä säällä. Ilman lämpötila oli noin 10 °C, ilman suhteellinen kosteus oli 73 % ja kastepistelämpötila +5 °C. Siltakannen pintalämpötila oli noin +5 °C ennen kuivausta.

Ennen asennusta koko siltakansi kuivattiin 2-liekkisellä nestekaasupolttimella. Levityskohtaa kuivattiin uudelleen ennen kermirullan levitystä. Kuivauksen aikana siltakannen pinta myös lämpeni hieman. Ennen kermin levitystä mitattiin levityskohdan betonin pintalämpötilaksi noin 10 °C.

Aluskermi asennettiin sillalle kolmella eri asennustavalla, taulukko 9. Koealueet on esitetty liitteen 3 kuvassa.

*Taulukko 9. Aluskerrin asennusmenetelmät Kyrölän sillalla.*

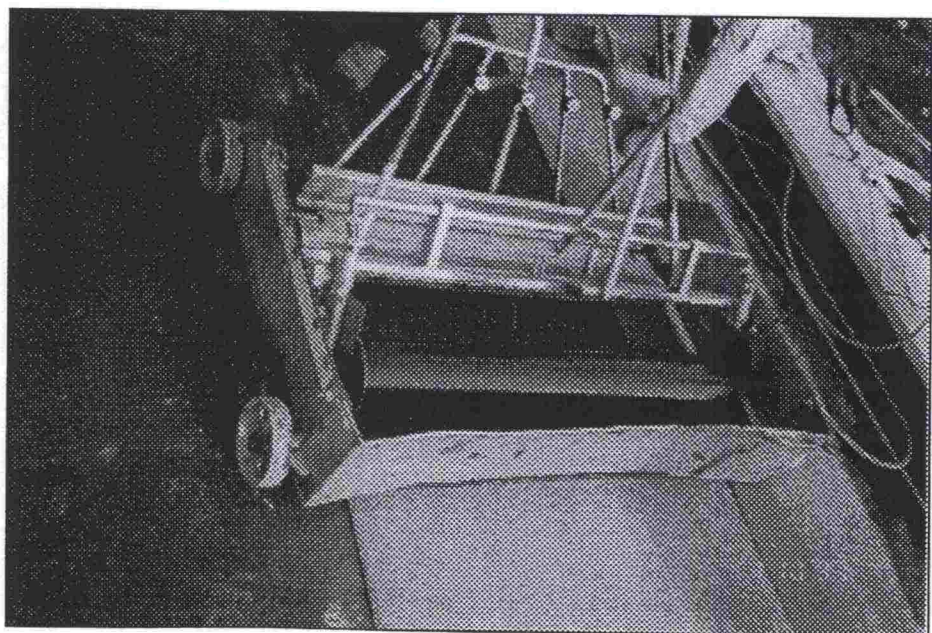
Koealue nro	Asennusmenetelmä
<b>1</b>	Asentaja kävelee eteenpäin asennettavan kermin päällä, levittää kermin jalalla kermirullaa työntäen, sulattaa hitsausbitumin 2-liekkisellä nestekaasupolttimella ja painelee kengänpohjalla kermin kiinni alustaan.
<b>2</b>	Asentaja asentaa kermin kävellen takaperin rullan edellä, vetäen toisella kädellä rullaa vetoaisalla ja sulattaen hitsausbitumin toisessa kädessä pitelemällä 2-liekkisellä nestekaasupolttimella, kuva 31.
<b>3</b>	Asentaja asentaa kermin levitysvaunulla, kävellen takaperin vaunun edellä ja vetäen samalla vaunua, joka oli varustettu 5-liekkisellä nestekaasupolttimella, tuulensuojareunoilla ja neljällä pyörällä, kuva 32.

Kullakin aluskerrin asennusmenetelmiltään toisistaan poikkeavalla kolmella koealueella mitattiin kermin tartunta siltakanteen.





*Kuva 31. Kermin levitys aisalla vetäen.*



*Kuva 32. Kermin asennus levitysvaunulla.*

### 3.2.3 Tulokset

#### 3.2.3.1 Eristysalustan jälkihoito ja pinnan puhdistus

Kasarmintien sillan aluskerrnin asennusaikana (2.6.1997) sääolosuhteet täyttivät SYL:n vaatimukset eristysurakoitsijan mittauksen mukaan. Bitumipata oli termostaatilla varustettu Grün Primat 250 ilman sekoitinta tai neste-vaippaa. Sillan kosteusmittaukset on käsitelty kohdassa 3.1.3.2.

Noin kolme viikkoa aluskerrnin asennuksen jälkeen kermi alkoi kuplia kaikilla kuudella koealueella. Kuplineista kohdista kaavittiin siltakannesta kumibituminäytteet, jotka tutkittiin laboratoriossa, ks. kohta 3.3.3.7. Kumibitumin pehmenemispiste ja palautuma alittivat merkittävästi vaatimuksen. Kumibitumin ylikuumentaminen padassa eristystöön aikana oli todennäköinen syy kermien kuplimiselle.

Aluskerrnin tartuntakokeet tehtiin noin viikko kuplimisen alkamisen jälkeen. Tartunnat mitattiin kohdista, jotka näyttivät silmämääräisesti olevan kiinni alustassa. Kahdella koealueella tartunta täytti vaatimuksen kaikkien kolmen rinnakkaisnäytteen osalta, muilla alueilla 1-2 koetta kolmesta alitti vaatimuksen.

Tartunta irtosi lähes yksinomaan kumibitumin leikkaantuessa. Koska irtomiskohta oli liimausbitumikerroksen sisällä, ei alustan pintaominaisuuksien erojen vaikutusta tartuntalujuuteen voitu selvittää.

Kaikkien koealueiden kupliminen aiheutui todennäköisesti merkittävästi bitumin ylikuumentamisesta johtuvasta syystä, mikä peitti mahdolliset erot, joita eri jälkihoito- ja puhdistusmenetelmäkoealueilla olisi ollut.

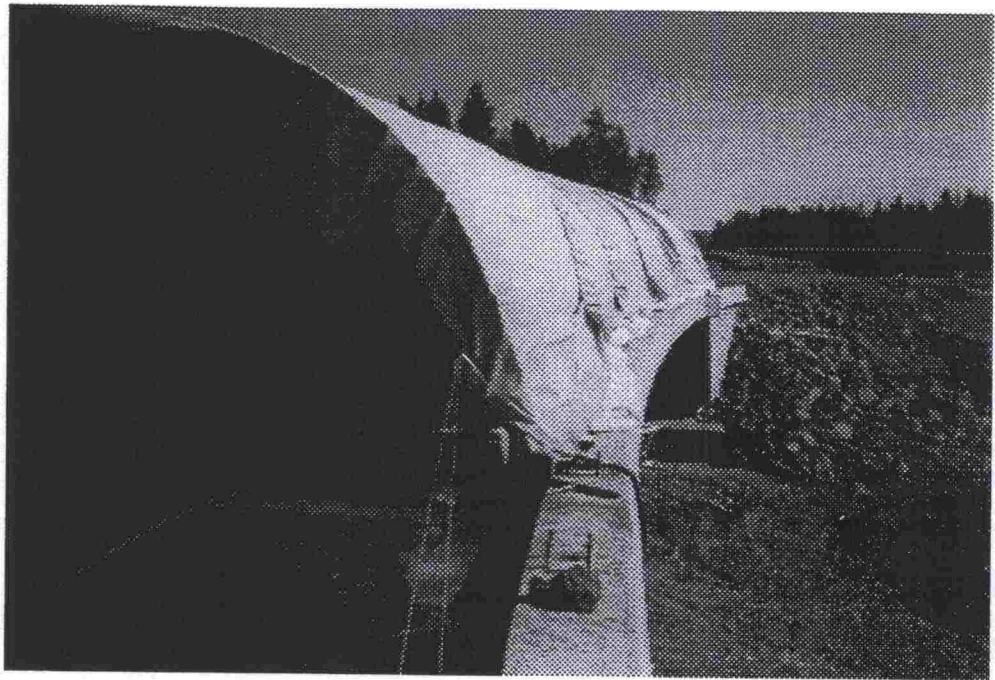
#### 3.2.3.2 Sääsuojahallitutkimus

##### Sääsuojahallin rakenne

Hallin rakenteessa ja käytössä oli lukuisia ongelmia. Se oli liian kapea siltaan verrattuna ja sen peitteet oli kiinnitetty huonosti. Hallin päältä vesi valui reunapalkin päälle ja siitä ainakin osittain kannelle. Sivuseinien peitteet oli sidottu vaakasuoraan putkeen noin 50 cm reunapalkin yläpuolelta. Tästä putkesta reunapalkkiin roikkui vapaasti helma, jonka alta tuuli pystyi painamaan sadeveden siltakannelle.

Ajoittain todettiin pressujen päällä suuria vesitäyhteisiä lammikoita ja peittämättömiä aukkoja jatkosten kohdilla, joista vesi pääsi satamaan halliin.





Kuva 33. Liian kapean sääsuojahallin päältä sadevesi valui reunapalkille ja siitä siltakannelle.

#### Kannen pinta

Tasaisuusvirheiden vuoksi vesi muodosti kannelle lätäköitä. Lätäköitä oli myös sääsuojahallin sisällä. Tasaisuusvirheitä yritettiin korjata vielä epoksin levityksen jälkeenkin.

Aliurakoitsija tasoitti betonipintaa käyttäen lattiatasoitetta, jonka kuumankestävyydestä ei ole tutkittua tietoa. Vielä epoksin levityksen ja bitumiliuoksen levityksen aikana kannen molemmilla reunoilla oli noin 100 cm leveä erittäin epätasainen alue.

#### Betonin kosteus

Hallissa oli betoniin poratusta 50 mm syvästä reiästä mitattu suhteellinen kosteus mittausajankohtana keskimäärin 92 %, joka on SYL6:n vaatimusraja. Hallin ulkopuolella oli vastaava arvo 94 %.

Betonin absoluuttinen kosteus oli hallista 11.7.1997 otetuissa 40 mm korkeissa lieriönäytteissä keskimäärin 4,6 % ja hallin ulkopuolella 4,7 % (SYL:n vaatimus on  $\leq 4,5$  %). Viikkoa myöhemmin otetuissa näytteissä oli betonin kosteus hallissa alentunut 4,1 %:iin, mutta ulkopuolella pysynyt ennallaan. Näytekohtaiset kosteudenmittaustulokset on esitetty väliraportin liitteessä, [2]. Absoluuttisessa kosteudessa näytteiden välillä oli huomattavan suuria eroja. Erojen syitä on vaikea selittää, mutta veden ajoittainen lätäköityminen siltakannelle on yksi mahdollinen syy.

#### Epoksitiivistys

Epoksin levityspäivinä vallitsivat hyvät sääolosuhteet. Epoksin levitti kokenut epoksiurakoitsija. Työ kuitenkin epäonnistui, koska epoksin käyttöohjeita ei

noudatettu. Kun ensimmäistä epoksikerrosta levitettiin, oli aurinkoinen aamu ja betonikansi lämpenemässä viileän yön jälkeen. Toinen epoksikerros levitettiin jo samana päivänä, jolloin alitettiin käyttöohjeen mukainen kovettumisaika huomattavasti.

*Epoksin tartuntalujuus* tutkittiin yhteensä 18 vetokokeella, joista 9 tehtiin sääsuojahallissa ja 9 hallin ulkopuolella. Epoksitiivistys täytti SYL 6:n epoksin tartunnalle betoniin asettamat vaatimukset. Tartunta irtosi joko vetonapin ja epoksin välisestä liimasaumasta tai murtaen betonia. Epoksin näytekohtaiset tartuntakoetulokset on esitetty väliraportissa [2].

Koska tartunta ei irronnut epoksin ja betonin välistä, ei tuloksista voida tehdä johtopäätöksiä sääsuojahallin vaikutuksesta epoksin tartuntaan. Tapauksissa, joissa tartunta irtosi murtaen betonia, ei saavutettu arvo kuvaa suoraan betonipinnan vetolujuutta, koska suoraan rakenteesta tehtävissä betonipinnan lujuuskokeissa (SFS 5446) porataan irrotettavan betonisynterierunat syvemmälle betoniin kuin epoksin tartuntakokeessa, jossa epoksin reunat irrotetaan vain betonipintaan asti.

*Epoksin vesitiiviys* tutkittiin sääsuojahallin ulkopuolella viidestä kohdasta ja hallissa samoin viidestä kohdasta. Vesitiiviyttä kuvaa epoksikerroksen eristysvastus, jonka tulee ylittää 500 M $\Omega$ . Vertailuarvona on pelkän kansibetonin eristysvastus. Näytekohtaiset koetulokset on esitetty väliraportissa, [2].

Vesitiiviyden osalta epoksi ei täyttänyt SYL:n vaatimuksia. Kohdissa, joissa vesitiiviys ei täyttänyt vaatimuksia, oli epoksissa pieniä ( $D \approx 0,5-2$  mm) pyöreitä reikiä tai "kraatterin" muotoisia puhjenneita kuplia ( $D \approx 5$  mm). Sääsuojahallin sisällä levitetyssä epoksissa oli erityisen runsaasti pieniä reikiä, mutta ei lainkaan puhjenneita epoksikuplia. Sääsuojahallin ulkopuolella epoksissa oli vähemmän pieniä reikiä, mutta niiden lisäksi tällä alueella oli puhjenneita kuplia.

Epoksin ensimmäinen kerros oli levitty lämpimällä säällä betonikannen lämpenemisen aikana (viileän yön jälkeen). Tällöin betonin höyrönpaine kasvoi ja siitä poistui vesihöyryä. Toinen kerros oli levitetty samana päivänä siten, että odotusaika kerrosten levitysten välillä oli lyhyempi kuin epoksin maahantuojan käyttöohjeet sallisivat. Todennäköisesti näistä syistä epoksi ei täyttänyt vedenpitävyysvaatimusta. Päistään avoimessa sääsuojahallissa oli epoksin levityksen aikana viileämpää kuin hallin ulkopuolella, jossa aurinkoinen sää lämmitti kannen pintaa. Epoksin ensimmäisen kerroksen kovettuminen ennen toisen kerroksen levitystä (samana päivänä) oli tästä syystä hitaampaa hallissa kuin ulkoalueella.

Korjaustoimenpiteeksi maahantuoja antoi ohjeen hiekkapuhaltaa epoksin pinta kevyesti ja levittää kolmas epoksikerros ilman sirotetta. Epoksin korjaustyön teki eristysurakoitsija.

Korjauksen jälkeen epoksin vesitiiviyttä ei mitattu uudelleen. Todennäköisesti se kuitenkin täytti korjauksen jälkeen vesitiivisyysvaatimukset.



### Kermin tartunta alustaan

Taulukossa 10 on esitetty, kuinka suuri osa kullakin koealueella tehdyistä aluskermien vetokokeista täytti SYL:n vaatimuksen ennen ja jälkeen asfaltointin. Jos kaikki vedot täyttivät vaatimuksen on taulukossa merkintä "ok". Jos sen sijaan esim. kaksi vetoa neljästä täytti vaatimuksen, lukee taulukossa "2/4 osa ok". Näytekohtaiset tulokset on esitetty väliraportissa 2.

Sääsuojahallissa olleet koealueet täyttivät yleensä paremmin vaatimukset kuin ulkoalueet. Poikkeuksen tekee B6, jolla epoksialustalla kermi irtosi epänormaalin alhaisella lujuustasolla.

Liimatut kermiä täyttivät vaatimukset paremmin kuin hitsatut. Asfaltointin jälkeen tartunta parani kaikilla tutkituilla koealueilla.

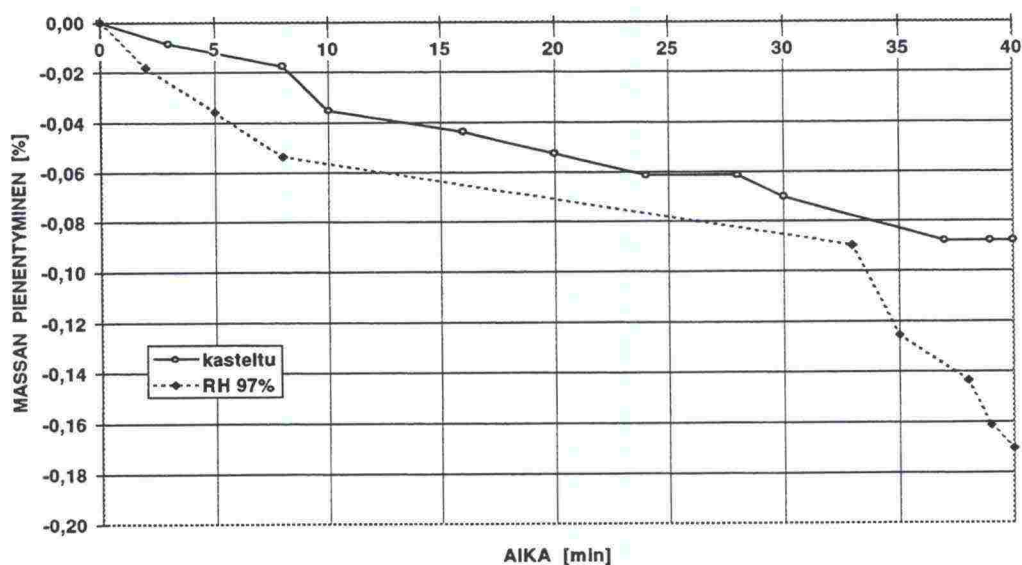
*Taulukko 10. Yhteenveto sääsuojahallitutkimuksen aluskermien tartuntakoetuloksista.*

Koe- alue	Eristysalustan tartuntasively tai tiivistys	Aluskermi	Aluskermin tartunta	
			Ennen asfaltointia	Asfaltoinnin Jälkeen
Ulkoalueet A1...A4 ja B1...B2				
A1	KBL 20/100	K-ML hits.	2/4 osa ok	Ok
A2	KBL 20/100	K-TMS hits.	1/3 osa ok	ei tutkittu
A3	epoksitiivistys	K-MS liim.	ok	ei tutkittu
A4	epoksitiivistys	K-MS hits.	ok	ei tutkittu
B1	KBL 20/100	K-MS liim.	3/4 osa ok	5/6 osa ok
B2	KBL 20/100	K-MS hits.	1/6 osa ok	ei tutkittu
Sääsuojahallilla katettu sillan osa B3...B6				
B3	KBL 20/100	K-MS liim.	ok	ei tutkittu
B4	KBL 20/100	K-MS hits.	ok	ei tutkittu
B5	epoksitiivistys	K-MS liim.	ok	ok
B6	epoksitiivistys	K-MS hits.	7/10 osa ok	ei tutkittu

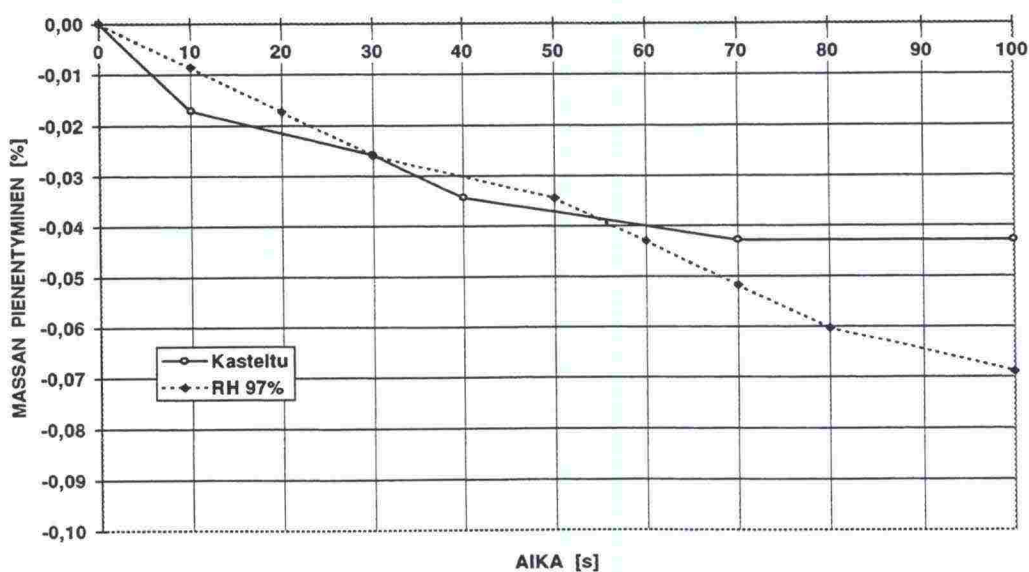
## 3.2.3.3 Betonipinnan kuivausmenetelmät

Laboratoriokokeet

Laboratoriossa suoritettujen kuivauskokeiden tulokset esitetään kuvissa 24 ja 25. Kuvassa 34 on esitetty koelaatan massan pientyminen (% märkä-massasta) lämpösäteilykuivauksessa ja kuvassa 35 vastaavasti liekkikuivauksessa.



Kuva 34. Betonilaatan massan pientyminen lämpösäteilykuivauksessa. Betonikoostumus 1, laatta kasteltu / säilytetty RH 97 %:ssa.



Kuva 35. Betonilaatan massan pientyminen liekkikuivauksessa. Betonikoostumus 3, laatta kasteltu / säilytetty RH 97 %:ssa.



Kaikkien betonilaattojen massat pienenivät kuivauskokeen aikana. Merkille pantavaa on, että molemmissa kuivauskokeissa RH 97 %:n kosteustilassa olleesta laatasta poistui enemmän kosteutta kuin vesiupotuksessa 24 h olleesta pintakuivasta laatasta. Myös viimeksi mainittu oli ollut ennen veteen upottamista RH 97%:n kosteustilassa.

Mikroskooppitutkimuksen perusteella kuumennus lisää jonkin verran betonilaatan pintaosan säröilyä ja kuivumista muutaman millimetrin syvyydelle. Kuumennus ei näyttäisi kiihdyttävän pinnan karbonatisoitumista eikä lisäävän säröilyä syvemmällä betonissa.

Kuumennus aiheuttaa vähän pinnansuuntaisia ja pystyjä (keskimäärin 1 kpl/10 mm), muutaman millimetrin syvyisiä säröjä betonin pintaosaan. Paikoitellen pinnassa tavattu pienempi vesisideainesuhde kuumennetuissa laatoissa verrattuna syvemmälle betoniin tai vertailunäytteisiin viittaa ilmeisesti pinnan kuivahtamiseen kuumennuksessa. Tämä saattaa lisätä pinnan haurastumista jonkin verran. Eri kuivausmenetelmien tai betonikoostumusten mahdolliset erot betonipinnan vaurioittamisriskin kannalta eivät tulleet esiin ohuthieanalyysissä.

#### Työmaakokeilu

Kuivauskokeilusillan kannen betoni oli suhteellisen hyvin tiivistettyä, mutta rakenteeltaan hieman epähomogeenista. Epähomogeenisuus johtui betonin suuresta ilmamäärästä. Tutkituista kannen yläpinnan näytteistä kolmen ilmamäärä oli noin 10 % tai hiukan suurempi, yhden selvästi suurempi. Kaikissa näytteissä on jonkin verran kutistumissäröilyä, joka on tyypillistä lujille betoneille.

Kuumennuspintausrakenteella suoritettua kuivauksen jälkeen otettujen näytteiden pintaosissa ei todettu mitään eroja vertailunäytteisiin verrattuna. Kuivaus tällä sillalla käytetyllä lämmitysteholla ei ole aiheuttanut mitään muutoksia betonin pintaosiin. Tuloksia arvioitaessa on otettava huomioon näytteiden pieni määrä.

Betonin kosteuteen ei kuumennuspintausrakenteistolla ollut merkittävää vaikutusta, taulukko 11. Näytteenottotavasta johtuen kosteuden määrittäminen betonin pintaosan noin 70 mm paksuisen kerroksen keskimääräisenä arvona. Hetkellinen kuivaus vaikutti lähinnä betonin yläpintaan ja aivan pinnasta betoni kuivui kuivauksen aikana. Vaikutus on kuitenkin lyhytaikainen, koska alemmista kerroksista kosteus nousee pinnasta haihtuneen veden tilalle.

*Taulukko 11. Kuivauskokeilusillan absoluuttinen kosteus.*

	Kansibetonin absoluuttinen kosteus (%)		
	Kohta 1	Kohta 2	Keskiarvo
Ennen kuivausta	5,4	5,6	5,5
Kuivauksen jälkeen	5,6	5,3	5,5

Näytekohtaiset tulokset betoniteknisistä havainnoista ja kosteusmittauksista on esitetty väliraportissa, [2].

#### 3.2.3.4 Kermien asennusmenetelmätutkimus

Levitysvaunulla levitetty aluskermi tarttui huomattavasti huonommin kuin muilla menetelmillä asennettu. Tällä menetelmällä kaikki näytteet irtosivat kumibitumiliuosivelyn ja hitsausbitumin välistä. Alittavia tuloksia oli kahdeksan, yksi irtosi leikattaessa ja yksi täytti vaatimuksen.

Kahdella muulla menetelmällä kermi irtosi tartuntakokeessa yleensä tukikerroksesta siten, että tukikerroksesta jäi molempiin irtoamiskohdan pintoihin. Niissä kohdissa, joissa tartunta irtosi tukikerroksesta, jäi asennusmenetelmän vaikutus tartuntaan epävarmaksi. Koska tartuntakokeet tehtiin viileällä säällä, bitumin vetolujuus oli verrattain korkea ja ylitti kermin sisäisen lujuuden. Merkille pantavaa on, että irtoaminen tukikerroksesta tapahtui suhteellisen alhaisilla voimatasoilla (alle tartuntalujuusvaatimusrajan).

Seuraavana kesänä vuonna 1998 lyhyen lämpimän sääjakson jälkeen kirjattiin sillalla kaksi varmaa kuplahavaintoa ja kaksi mahdollista kuplaa. Kaksi kuplaa sijaitsi levitysvaunulla levitettyä koealuetta ja kaksi saumakohtassa vetoaisalla ja jalalla levitettyjen koealueiden rajalla. Kuplat sijaitsivat koealueiden alku- ja loppupäässä.

Erityisen runsaasti tukikerroksesta irronneita testikohtia oli vetoaisalla levitettyssä kermessä, mikä heikentää tämän menetelmän asemaa vertailussa ja parantaa jalalla levitetyn kermin tulosta siihen verrattuna. Näytekohtaiset tulokset on esitetty väliraportin liitteessä, [2].

Työteknisinä havaintoina todettiin:

- Siltakannen kuivaaminen oli välttämätöntä ja lievä pinnan lämmitys hyödyllistä työn onnistumisen kannalta.
- Kaikilla kolmella vertaillulla asennusmenetelmällä pystyttiin työ suorittamaan.
- Viileä sää korosti asentajan ammattitaidon merkitystä: betonin kuivaus tuli ajoittaa ja kaasuliekki säätää oikein.
- Hitsausbitumi kulkee aaltona rullan edessä. Tällöin vetoaisan käyttö mahdollistaa helpommin tasaisen levitysnopeuden ja samalla tasaisen hitsausbitumin leviämisen verrattuna rullan levittämiseen jalalla työntäen. Viimeksi mainitussa menetelmässä on myös suurempi riski, että asentajan kengät painavat jälkiä kermin pintaan asentajan kävellessä kuumien kermin päällä. Tällä sillalla ei näitä vaurioita ollut.

Levitysvaunun avulla saatiin tasainen levitystulos. Viiden liekkisuuttimen erillinen säätö on kuitenkin hieman vaikeampaa kuin kaksiliekkeisen polttimen säätö. Koealueen alussa yhdessä kohdassa limityssauma jäi osittain auki. Irti oleva kermisuikale saumakohtassa leikattiin pois. Kunkin kermirul-



lan loppupää joudutaan hitsaamaan käsin ja tällöin menetelmää vaihdettaessa saattaa liimausbitumin levitys jäädä epätasalaatuiseksi.

### 3.3 Eristyksen vauriot ja laatu

#### 3.3.1 Yleistä

Eristyksen vaurioiden tutkimisen avulla pyrittiin selvittämään vaurioitumiseen johtaneita syitä. Vaurioita tutkittiin simuloimalla kuplimista laboratorioissa sekä koerakentamisen ja työmaalla todettujen vauriokohtien tutkimisen avulla. Eristyksen laatututkimukset kohdistettiin eristysalustan karkeuteen, kumibitumin laatuun ja vauriokohteiden tutkimiseen.

#### 3.3.2 Aineisto ja tutkimusmenetelmät

##### 3.3.2.1 Kermien kuplimisen kokeellinen simulointi

Kermin kuplimisen laboratoriokokeita varten suunniteltiin ja valmistettiin VTT Yhdyskuntatekniikassa kuplimissimulaattori, jossa pystytään yhdessä ko-keessa tutkimaan kerrallaan neljä eri tavoin eristettyä betonilaattaa. Kunkin betonilaatan koko on 300\*300\*80 mm<sup>3</sup>. Koesarjaa varten valmistettiin 72 be-  
tonilaattaa, joiden koostumukset olivat samat kuin betonin kuivumisnopeus-  
kokeessa, kohta 3.1.2.3, taulukko 7.

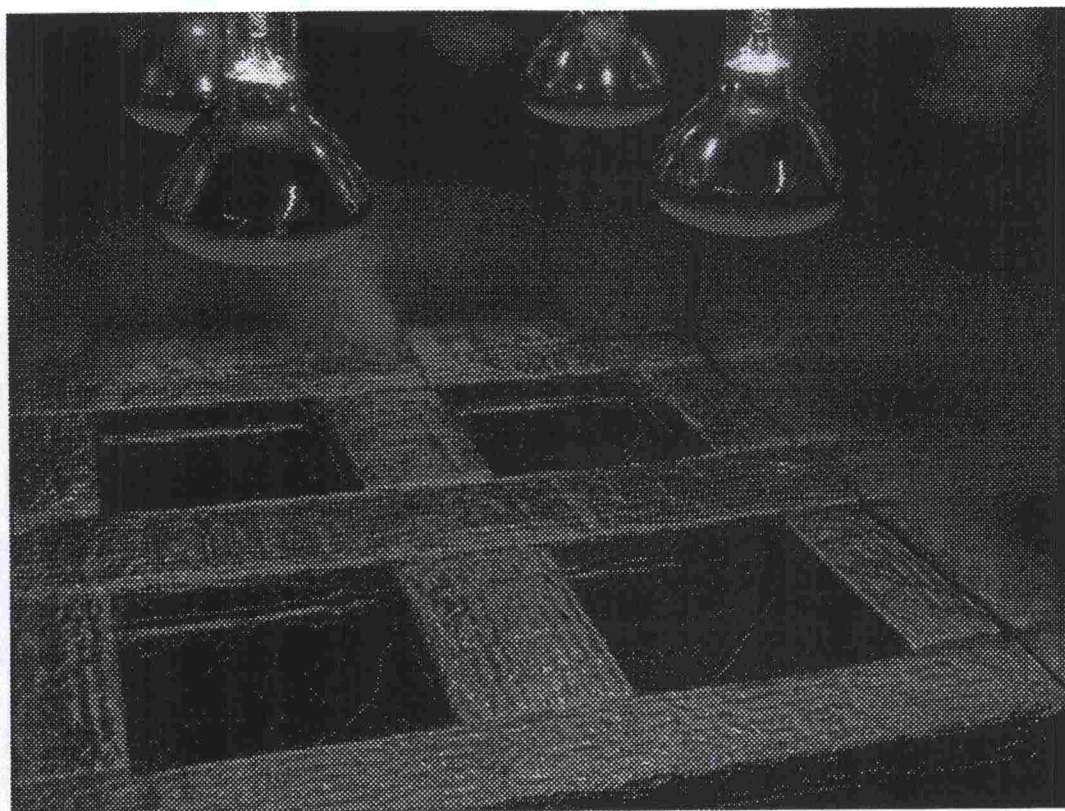
Betonilaattojen yläpinta märkähiekkapuhallettiin noin 28 vrk iässä, jonka jäl-keen laattoja säilytettiin vakio-olosuhteissa (RH 94%/ 23 °C) noin puoli vuot-  
ta ennen kokeiden alkua.

Hiekkapuhallettujen betonilaattojen yläpinnan makrokarkeus mitattiin lasi-  
helmimenetelmällä (PANK-5103) ja laatat järjestettiin pinnan karkeuden pe-  
rusteella ryhmiin siten, että samaan kokeeseen menevät laatat omasivat sa-  
man suuruusluokan pintakarkeuden. Laattojen pinnan makrokarkeus vaihteli  
välillä 0,5 - 1,1 mm.

Koelaattojen sivupinnat sekä yläpinnan reunat 20 mm leveydeltä tiivistettiin  
2-kertaisella epoksitiivistyksellä (Ergoflex-Dur 500S) ja yläpinta eristettiin  
tutkittavalla eristysrakenteella. Laattojen eristysten perusvaihtoehdot olivat  
taulukon 12 mukaiset.

Taulukko 12. Laattojen eristyksen perusvaihtoehdot.

Esikäsittely	Aluskermi ja kiinnitystapa
KBL	Icopal KMS170/3000 + Lemm. KB100
KBL	Lemm Kerabit 4500 UT hits
KBL	Katepal KMS 170/3000 + Katep. KB
2-kert. epoksi	Icopal KMS170/3000 liim + Lemm. KB100



Kuva 36. Kuplimissimulaattori ja neljä koelaattaa.

Lisäksi tutkittiin aluskerrin ja pelkän hitsausbitumisivelyn kuplimisherkkyyttä teräspinnalla sekä liimausbitumin koostumuksen vaikutusta vaihtoehtoina KB 100, puhallettu bitumi ja niiden seos (50%/50%).

Välittömästi ennen laattojen asettamista kuplimissimulaattoriin, imeytettiin laatan alapintaan vettä säilyttämällä laattoja osittaisessa vesiupotuksessa yksi tunti (veden syvyys oli 1/3 osa laatan paksuudesta). Tämän jälkeen laatan alapinta tiivistettiin kumimatolla, teräslevyllä ja reunapuristimilla.



### 3.3.2.2 Vauriotutkimukset

Kuplimisvaurioiden syitä tutkittiin 9:llä sillalla, taulukko 13. Näistä silloista seitsemällä otettiin kannesta betoninäytteitä. Betoninäytteistä tutkittiin silmämääräisesti pinnassa näkyvät virheet ja vauriot. Näytteistä valmistettiin mikrorakennetutkimuksia varten ohuthieet, jotka tutkittiin polarisaatio- ja fluorenssimikroskoopilla. Mikrorakennetutkimuksin selvitettiin mm. betonin tasalaatuisuutta, huokoisuutta ja sisäisiä virheitä (säröt, halkeamat).

Kermin alla todetuista kuplista otettiin kaasunäytteitä injektioneulalla. Kuplien sisältämän kaasun koostumus analysoitiin kolmen sillan näytteistä. Aiemmin oli tutkittu neljän muun sillan kuplien kaasunäytteet eli yhteensä kaasukuplanäytteitä on tutkittu 7 sillalla.

Kärkistensalmen sillalla otettiin termooanalyysitutkimusta varten kermin kuplan kohdalta poranäyte betonikannesta ja kerminäyte leikkaamalla. Termooanalyysin tarkoituksena oli selvittää, onko betoninäytteen pinnasta tai kumibitumikermin alapinnasta löydettävissä termooanalyttisesti merkkejä kumibitumiliuoksen liuottimesta.

Analyysejä varten osa tartuntakerroksesta raaputettiin irti betoninäytteen pinnasta. Samoin raaputettiin kumibitumikermin alapinnasta siihen betonin pinnasta tarttunutta kerrosta. Vertailunäyte oli kumibitumiliuoksesta, joka oli otettu työmaalla tynnyristä. Tarkemmin termooanalyysimenetelmä on kuvattu väliraportissa, [2].

*Taulukko 13. Tutkittuja eristysvauriosiltoja.*

Silta	Sijainti	Eristysvuosi	Vaurio Todettu	Vauriot
Kärkistensalmen s.	Korpilahti	1997	1997	Eristys kupli eristystyön aikana
S 519 Santavuoren rs B (vt3/ M-tien silta)	Iittala	1995	1997	10 kuplaa, päällyste noussut Päällyste purkaantunut ja eristys puhki yhden kuplan kohdalta
S 519 Santavuoren rs A	Iittala	1995	1997	Yksi kupla
S 612 Rontun rs	Iittala	1995	1997	6 kohtaa irti alustasta (todettu koputtelemalla)
S 613 Kaarneenmäen rs	Iittala	1995	1997	12 kuplaa
S 610 Heinun rs	Iittala	1995	1997	21 kuplaa
Paraatinmäen rs	Raahe	1995	1997	useita kuplia
S 383 Keihärinkosken rs	Viitasaari	1997	1997	Kuplia kauttaaltaan keskiviivan tuntumassa (alle 2 viikkoa eristämisen jälkeen)
Kasarmintien ylik. s.	Oulu	1997	1997	Eristys kupli kauttaaltaan

### 3.3.2.3 Kansibetonin huokoisuusvaihtelut syvyyssuunnassa

Kaakkois-Suomen tiepiirin hankkeelta "vt 7 Otsola - Summa" todettiin vuonna 1995 kuplimisvaurioita seitsemällä sillalla. Nämä vauriot ehdittiin kuitenkin korjata ennen tarkempaa tutkimista. Silloista valittiin myöhemmin kolme erilliseen selvitykseen, jossa pyrittiin tutkimaan kansibetonin huokoisuuden vaihtelua pystysuunnassa siltakannen läpi porattujen betoninäytteiden avulla. Yhdeltä sillalta (Sakin silta) on lisäksi tutkittu kerminäytteen kiinnitysbitumin ominaisuuksia (ks. kohta 3.3.3.7). Tiepiirin ilmoittamat silloissa käytettyjen betonien koostumustiedot on esitetty taulukossa 14.

Taulukko 14. Betonien koostumustiedot ja betonointiajankohdat.

	Keltakallion s S12	Karhunkan- kaan s. S20	Sakin s. S 29, pohj.
Betonointi	11.11.1992	18.6.1992	17.12.1992
Lujuusluokka	K40-1	K40-1	K35-1
P-luku		P20	
Vesisideainesuhde	0,43	0,35	0,44
Ilmavesisuhde	>0,2		>0,25
Huokostin	Parmix L	Frobe/Fescon	Parmix L
Jälkihoito	vesi+muovikelmu		Curing 101
Nesteytin		Sikament FF40	

Siltakannesta poratut betoninäytteet tarkastettiin silmämääräisesti, niille tehtiin huokoisuustutkimuksia eri syvyyksiltä kapillaarisella vedelläkylästyskokeella ja yhdelle betoninäytteelle tehtiin mikroskooppitutkimus, [1].

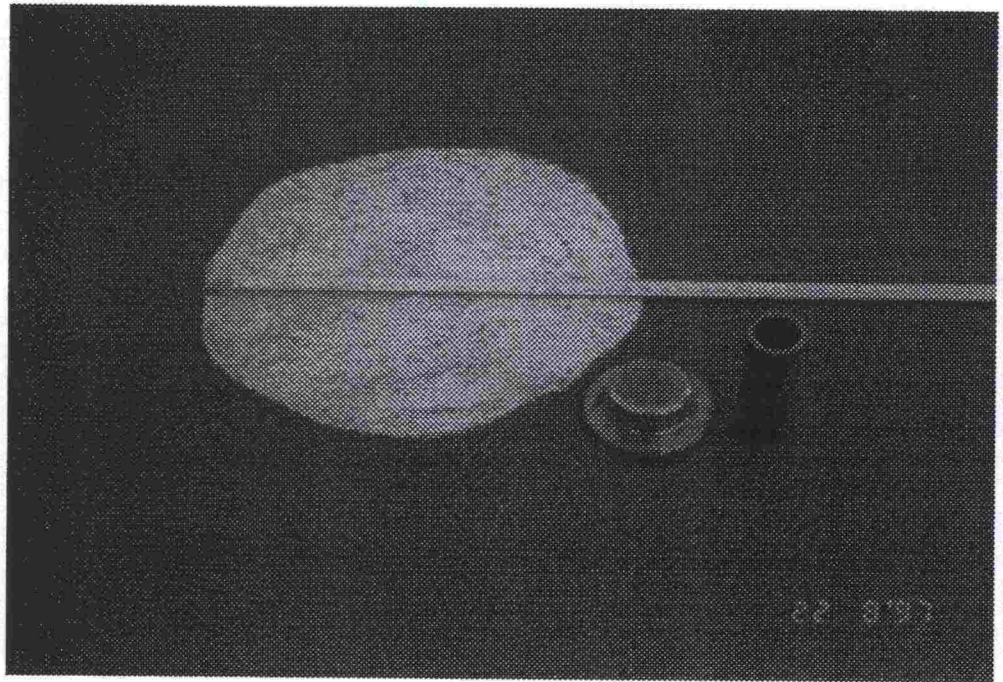
Syksyllä 1998 tehtiin huokoisuustutkimuksia Porissa vt 2:lla sijaitsevan Aseman risteys sillan kannen betonille. Risteys sillalta koostuu kahdesta rinnakkaisesta sillasta. Toisen sillan toisen pään ylimmässä, noin 20 cm paksussa kerroksessa, käytettiin huokostamatonta betonia. Tutkimuksen tarkoituksena oli selvittää kannen betonin huokoisuutta, huokoisuuden vaihtelua syvyyssuunnassa ja ylimmän valukerroksen betonin huokostamatta jättämisen vaikutusta yläpinnan betonin huokoisuuteen.

### 3.3.2.4 Eristysalustan pinnan karheus

Betonialustan pinnan makrokarheus vaikuttaa mm. eristyksen tartunta- ja kuplimisominaisuuksiin. Makrokarkeudella tarkoitetaan pinnan pienimuotoista epätasaisuutta, jonka aallonpituus on 0,5 - 50 mm. Liian sileä pinta heikentää tartuntalujuutta ja liian karkea pinta lisää eristyksen kuplimisriskiä.

VTT valmisti ja toimitti neljälle Tielaitoksen rakennushankkeelle mittausvälineet eristysalustan makrokarkeuden mittauksia varten. Betonisten siltakansien makrokarheus mitattiin ns. lasihelmimenetelmällä PANK-5103 hiekkapuhalluksen jälkeen. Mittaustulokset saatiin 12 sillalta.





Kuva 37. Eristysalustan makrokarkeuden mittaus lasihelmimenetelmällä.

#### 3.3.2.5 Kumibitumin laatututkimus

Kumibitumin laatu tutkittiin v. 1996-97 silloilla, joilla eristystyön valmistumisen jälkeen oli todettu liimaamalla kiinnitetyn aluskerrin tartuntalujuuden alituksia tai kerrin kuplimista. Niiltä silloilta, joilla ilmeni näitä laatuongelmia, pyydettiin siltatyömaita lähettämään näyte sekä padasta että säkistä otetusta kumibitumista. Kumibituminäytteitä tutkittiin 9:ltä sillalta.

### 3.3.3 Tulokset

#### 3.3.3.1 Kermien kuplimisen kokeellinen simulointi

Kuplimissimulaattorin avulla kerrin kuplimisilmiö pystyttiin jäljittelemään kokeellisesti laboratoriossa ja tutkimaan hallitusti eri muuttujien vaikutus kuplien muodostumiseen. Simulointikokeissa saatiin seuraavia tuloksia:

##### Eristysalustatyyppin vaikutus

- Eniten kermiä kuplivat huokostetulla betonilla (tyyppi 2/ Rapid-sementti)
- Jonkin verran kermiä kuplivat huokostetulla betonilla (tyyppi 1/ Yleis-sementti)
- Vähiten kerrin kuplia oli huokostamattomalla betonilla (tyyppi 3/ Rapid-sementti)
- Teräsalustalle levitettyyn kermiin tai kumibitumiin ei syntynyt kuplia.

#### Alustan kosteuden vaikutus

- Kuplia syntyi sekä RH 94 %:n kosteudessa olleille että täysin märille betonialustoille levitetyille kermeille.

#### Alustan esikäsittelyn vaikutus

- Kermieristys kupli simulointikokeissa yleisesti, kun betonialustan esikäsittelyaine oli kumibitumiliuos.
- Kermi epoksitiivistetyllä pinnalla ei kuplinut (lukuunottamatta työvirhekohtaa).

#### Kermin kiinnitysbitumin vaikutus

- Puhalletun bitumin tai kumi- ja puhalletun bitumin seoksen käyttö ei poistanut kuplimisongelmaa
- Liimausbitumien vertailukokeessa 60 °C:ssa kuplivat muut paitsi epoksitiivistetty rakenne

#### Kermityypin vaikutus

- Kuplia syntyi sekä liimaamalla että hitsaamalla kiinnitettyihin K-MS-kermeihin.
- Lasikuitukangas kermin tukikerroksena ei estänyt kuplimista.

#### Kermin pintalämpötilan vaikutus

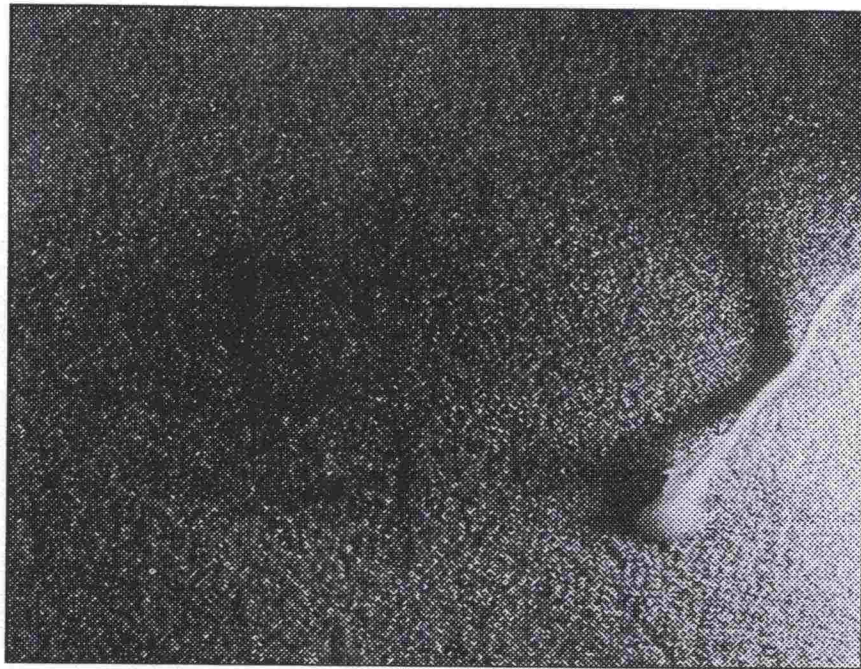
- Kuplimiseroja eri eristysrakenteiden välillä on saatu aikaan lämpötiloissa +50 ja +60 °C. Jälkimmäisessä lämpötilassa kupliminen oli todennäköisempää.

Mahdollinen kupliminen tuli yleensä näkyviin noin kaksi viikkoa kokeen alkamisen jälkeen. Kuplat olivat aluksi pieniä rakkuloita kermin ja betonin välillä ja kasvoivat joko kennomaiseksi rakenteeksi kermin alapuoliseen bitumikerrokseen tai suuremmiksi yksittäisiksi kupliksi kermin ja betonin väliin. Kuvassa 38 on valokuva kuplimissimulaattorissa aikaan saadusta kermin kuplasta. Kupla näkyy kuvan keskialueella.

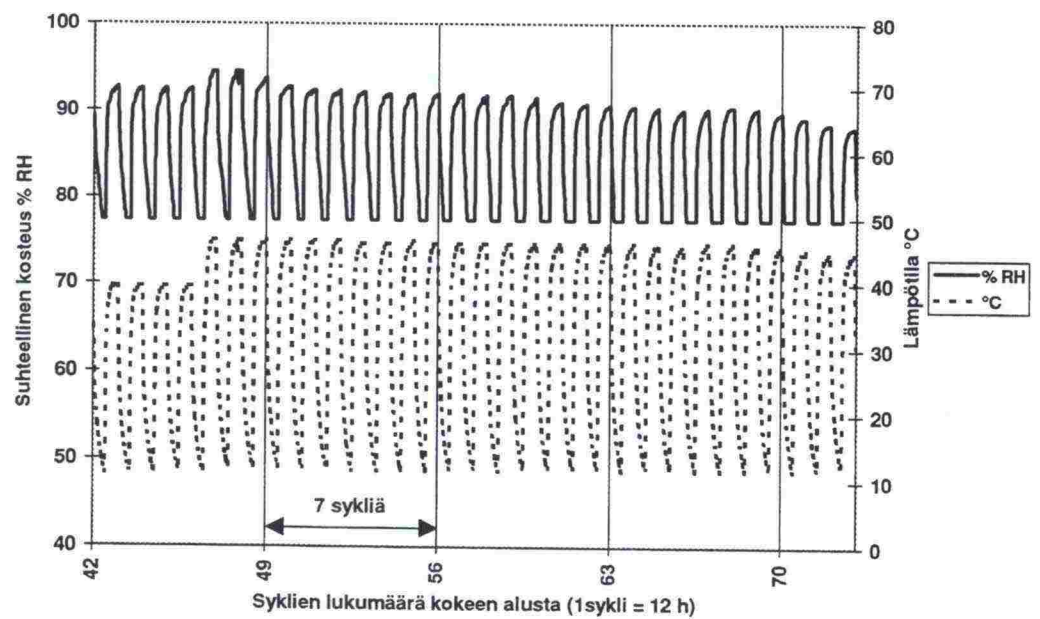
Kuvassa 39 on esitetty kuplimissimulaattorissa olevan betonilaatan lämpötilan ja kosteuden vaihtelu kokeen aikana (betonikoostumus 2/ taulukko 7). Betonilaatassa oli keskellä, lähellä laatan yläpintaa kermin alla betonoinnin yhteydessä asennettu mittausanturi. Betonilaatan kosteus- ja lämpötilakäyttäytyminen vastaa siltarakenteesta saatuja mittaustuloksia. Esim. kun lämpötila nousi lämmitysvaiheen aikana, nousi betonin suhteellinen kosteus huomattavasti (yli 10 %-yks.).

Taulukossa 15 on yhteenveto tehdyistä kokeista ja niiden tuloksista. Näytekohtaiset tulokset on esitetty väliraportissa, [2].





Kuva 38. Kermin kupla simulaattorikokeessa  
(oikeassa reunassa termoelementtilanka).



Kuva 39. Betonin pintakerroksen kosteuden ja lämpötilan vaihtelu kuplimis-  
simulaattorissa. Kermin pintalämpötila aluksi (4 sykliä) 50 °C,  
sen jälkeen 60 °C

Taulukko 15. Yhteenveto simulaattorikokeiden tuloksista.

Erä	Betoni- (alusta) laji	Betonin kosteus % RH	Pinnan karkeus mm	Lämpö- tila °C	Esi- käsit.	Aluskermin kiinnitys	Kupliko? Kupli/Ei
1	1	94	0,71	60	epoksi	Icop. KMS170/3000 liim + Lemm. KB100	E
	1	94	0,67	60	KBL	Icop. KMS170/3000 + Lemm. KB100	K
	1	94	0,69	60	KBL	Lemm Kerabit 4500 UT hits	K
	1	94	0,69	60	KBL	Katepal KMS 170/3000 + Katep. KB	K
2	2	94	0,68	60	epoksi	Icop. KMS170/3000 liim + Lemm. KB100	(E)
	2	94	0,50	60	KBL	Icop. KMS170/3000 + Lemm. KB100	K
	2	94	0,60	60	KBL	Lemm Kerabit 4500 UT hits	K
	2	94	0,65	60	KBL	Katepal KMS 170/3000 + Katep. KB	K
3	teräs			60	ei	Hits.bit.sively+Kerabit 4500 UT hits	E
	teräs			60	KBL	Lemm Kerabit 4500 UT hits	E
	teräs			60	ei	Lemm Kerabit 4500 UT hits	E
	teräs			60	KBL	Pelkkä hits.bit.sively	E
	teräs			60	ei	Pelkkä hits.bit.sively	E
	1	94		60	ei	Lemm Kerabit 4500 UT hits	E
	1	94		60	epoksi	Lemm Kerabit 4500 UT hits	E
4	3	94	0,51	60	epoksi	Icop. KMS170/3000 liim + Lemm. KB100	E
	3	94	0,60	60	KBL	Icop. KMS170/3000 + Lemm. KB100	E
	3	94	0,61	60	KBL	Lemm Kerabit 4500 UT hits	E
	3	94	0,67	60	KBL	Katepal KMS 170/3000 + Katep. KB	K
5	2	94	0,72	50	epoksi	Icop. KMS170/3000 liim + Lemm. KB100	E
	2	94	0,93	50	KBL	Icop. KMS170/3000 + Lemm. KB100	K
	2	94	0,68	50	KBL	Lemm Kerabit 4500 UT hits	E
	2	94	0,84	50	KBL	Katepal KMS 170/3000 + Katep. KB	K
6	1	94	0,77	50 ja 60	epoksi	Icop. KMS170/3000 liim + Lemm. KB100	E
	1	94	0,74	50 ja 60	KBL	Katep + KMS 170/3000 + seosbit	K
	1	94	0,79	50 ja 60	KBL	Katepal KMS 170/3000 + Katep. BIP	K
	1	94	0,41	50 ja 60	KBL	Katepal KMS 170/3000 + Katep. KB	K
7	1	94	0,61	60	epoksi	Icop. KMS170/3000 liim + Lemm. KB100	E
	1	100	0,54	60	epoksi	Icop. KMS170/3000 liim + Lemm. KB100	E
	1	100	0,65	60	KBL	Lemm Kerabit 4500 UT hits	K
	1	100	0,67	60	KBL	Katepal KMS 170/3000 + Katep. KB	K
8	3	94	0,76	60	epoksi	Katepal KML hits	E
	3	94	0,70	60	KBL	Katepal KML hits	K
	3	94	0,96	60	KBL	Katepal KML hits	K
	1	94	0,60	60	KBL	Katepal KML hits	K
9	1	94	0,98	60	epoksi	Icop. KMS170/3000 liim + Lemm. KB100	E
	1	94	0,89	60	KBL	Icop. KMS170/3000 + Lemm. KB100	E
	3	94	0,96	60	KBL	Lemm Kerabit 4500 UT hits	K?
	1	94	1,13	60	KBL	Katepal KMS 170/3000 + Katep. KB	E

Rakenteessa 9 oli mukana pintakermi

(E) = yksittäisen kermikuplan aiheutti työvirhe epoksissa

K? = yksittäinen vähäinen kuplinut kohta



### 3.3.3.2 Kuplimisvauriokohteiden betonitutkimukset

Betoninäytteiden tutkimusten tulosten mukaan betonin huokostuksessa oli puutteita kaikissa tutkimussilloissa lukuunottamatta yhtä siltaa, jonka betonia ei oltu huokostettu. Huokostuksesta johtuen betonin suojahuokosilmamäärä oli yläpinnassa kolmessa sillassa suuri, noin 10 %, ja yhdessä sillassa suurehko, yli 6 %. Kahdessa sillassa suojahuokosilmamäärä oli hyvä. Toisessa näistä huokostus oli kuitenkin epätasaista ja huokosten kokojakautuma oli epäedullinen. Oli alueita, joissa suojahuokosia oli erittäin vähän ja oli alueita, joissa suuria huokosia oli runsaasti ja pieniä vähän.

Yläpinnassa usean sillan betoninäytteissä oli pieniä repeytymiä ja säröilyä, joka ainakin osaksi johtuu pinnan hierrosta.

Tulosten mukaan yleisesti silloissa käytetyt betonit olivat yksittäisiä kohtia lukuunottamatta hyvin tiivistettyjä ja tasalaatuisia. Näytteissä todettu epähomogeenisuus johtui lähes yksinomaan siitä, että huokostus ei ollut onnistunut.

Betonin pinnasta otetussa tartuntakerroksessa ja kumibitumikermin alta otetussa näytteessä ei havaittu merkkejä kumibitumiliuoksen liuottimesta.

### 3.3.3.3 Kuplien sisältämän kaasun koostumus

Kermin kuplista otettujen kaasunäytteiden analyysissä todettiin, että näytteenottohetkellä kuplien sisältämän kaasuseoksen suurimman osapaineen aiheutti vesihöyry. Vesimäärä kaasuna on moninkertainen hiilivedyn määrään verrattuna. Hiilivetyjen vaikutus paineeseen on olematon.

Kuplan sisältämä kaasu saattaa kuitenkin vaihtua ajan mittaan, koska esim. lämpimänä päivänä muodostuva kermin kupla palautuu takaisin lähes betonipinnan tasoon viileän yön aikana. Tästä syystä ei ole täyttä varmuutta siitä, että kuplien sisältämä kaasu oli enimmäkseen vesihöyryä myös silloin, kun kuplat ensi kertaa nostivat kermin irti betonin pinnasta.

Taulukko 16. Kermin alta kuplista otettujen kaasunäytteiden koostumukset.

Silta	Tutk. vuosi	Todetut aineosat				
Kauklahden kev.liik. silta	1993	Vesi:hiilivedyt = 30:1 (kaasutilavuutena)				
		Kuplan sis. kaasut (til-%)				
		Typpi	happi	hiilidiok-sidi	vesi	hiilivedyt
Laaksontien rs.	1995	98,8 (summa N <sub>2</sub> +O <sub>2</sub> +CO <sub>2</sub> )			1,17	0,0005
Murhamäen rs.	1995	98,2 (summa N <sub>2</sub> +O <sub>2</sub> +CO <sub>2</sub> )			1,80	0,0009
Nokelan ylik.s.	1995	95,5	1,6	0,7	2,1	< 0,5
Kärkistensalmen s.	1997	73,1	19,5		6,8	0,6
Kaarnemäen rs.	1997	74,1	22,8	0,02	2,7	0,3
Heinun s.	1997	72,1	23,3	0,02	4,1	0,5

### 3.3.3.4 Kuplimisen mahdollisia syitä vauriokohteissa

Kuplimisen syiden selvittämiseksi tehtiin laboratoriokokeita, selviteltiin olosuhteita ja haastateltiin eristystyön osapuolia. Laboratoriokokeet ovat usein ns. poissulkevia menetelmiä. Jos tutkittu ominaisuus täyttää vaatimuksen, voidaan olettaa, ettei se ole kuplimisen aiheuttaja, vaan kupliminen johtui muista syistä.

Kermin alta kuplista otetut kaasunäytteet sisälsivät enimmäkseen vesihöyryä. Ne eivät osoittaneet, että liuottimet olisivat aiheuttaneet kuplimista. Myöskään termoanalyysikokeessa ei löydetty liuotinjäämiä betonista.

Betoninäytteiden tutkimustuloksia arvioitaessa on otettava huomioon johtopäätösten varmuutta heikentävänä tekijänä vähäiset näytemäärät.

Betoninäytteiden tutkimusten mukaan betonin huokostuksessa oli puutteita kaikissa tutkimussilloissa lukuunottamatta Santavuoren siltaa, jonka betonia ei ollut huokostettu. Huokostuksesta johtuen betonin ilmamäärät olivat yläpinnassa korkeita (4 siltaa) tai suojahuokosten kokonaisjakautuma ei ollut hyvä, suuria huokosia oli paljon ja pieniä vähän (2 siltaa). Lisäksi yläpinnassa oli useissa näytteissä pieniä säröjä ja repeytymiä.

Yläpinnassa todetut suuret ilmamäärät johtuvat todennäköisesti suurelta osalta ilman nousemisesta alemmista valukerroksista pintaan. Monessa kohteessa riittämätön pintaosan tiivistys on osasyynä pintaosan suureen ilmamäärään. Tämä johtuu siitä, että pinnan teko eri vaiheineen (pinnan tassausta tärypalkilla, hierto, reunapalkin tärytys ja hierto) sitovat käytettävissä olevasta työvoimasta niin suuren osan, ettei pintaosan tiivistykseen jää riittävästi työvoimaa. Riittämättömän tiivistyksen johdosta suojahuokosilman poistuminen pintakerroksesta on vähäisempää kuin hyvin tiivistetystä alaosasta ja luonnollisesti myös tiivistyshuokosten määrä on suurempi.



### Kärkistensalmen silta

Kermin kuplimisen aiheuttaja on todennäköisesti jokin seuraavista tekijöistä tai niiden yhteisvaikutus:

- Huonot eristysolosuhteet (esim. viileä sää, mahdollisesti korkea kosteus).
- Eristyksen heikko tartunta alustaan.
- Poikkeukselliset helteet suoja-asfaltin teon aikana heti viileän sääjakson jälkeen.
- Kermien asennus sillan poikkisuuntaan suuren pituuskaltevuuden omaavalla sillalla. Eniten kuplia oli suurimman pituuskaltevuuden kohdalla. Kun kermit on asennettu poikkisuuntaan, jyrän oma massa ei pidä kermiä paikallaan vaan jyrä alkaa työntää kermiä edellään. Tähän viittaa kuplien esiintyminen erityisesti aluskermien saumojen kohdilla.
- Kannelta kuplan kohdalta otetun bituminäytteen pehmenemispiste alitti vaatimuksen. Viileä sää lisää bitumin kuumennustarvetta ja samalla ylikuumentamisriskiä. Koska ensimmäisissä tartuntalujuusmittauksissa saatiin vaatimuksen alittavia tuloksia, myöhemmällä eristysosuudella liimausbitumin kuumennuslämpötiloja nostettiin tartuntalujuuden parantamiseksi. Padassa ei ollut sekoittajaa ja padan lämpömittari ei toiminut. Liimausbitumin kuumennuslämpötila arvioitiin "kokemuseräisesti".
- Mikrorakennetutkimuksen tulosten mukaan siltakannen betonin suojahuokosilmamäärä näytteessä on selvästi tavanomaista korkeampi, noin kaksi kertaa suurempi kuin tavoiteilmamäärä (4 - 5 %).

Paraatinmäen ja Kiiminkijoen siltojen betoninäytteistä saatujen tulosten perusteella molempien siltojen kansibetonin kokonaisilmamäärä määrä on huomattavan suuri. Yläpinnassa todetun suojahuokosten pienemmän määrän, niiden epätasainen jakautuminen ja säröilyn on aiheuttanut todennäköisesti pinnan hierto. Näytteissä todettu runsas ilmamäärä on todennäköisesti edistänyt kuplimista.

Kaarnenmäen ja Heinun siltojen betoninäytteistä ei ilmene selvää syytä kuplimiseen. Näytteiden yläpinnassa todettu epätasaisuus sekä syvemmillä todetut kolot ja huokoset ovat voineet edistää kuplimista. Kaarnenmäen sillan betonin ilmamäärä on korkeahko.

Kasarmintien ylikulkusilta

Todennäköisenä syynä kuplimiselle pidettiin kumibitumin ylikuumentamista työmaalla, ks. kohta 3.3.3.7.

Santavuoren silta

Santavuoren sillan betoninäytteissä ei todettu kuplimiseen vaikuttavia tekijöitä.

## 3.3.3.5 Kansibetonin huokoisuusvaihtelut pystysuunnassa

Kolmelta sillalta kannen läpi poratuista näytteistä eri syvyyksiltä määritetty ilmamäärä on esitetty taulukossa 17.

Taulukko 17. Kansibetonin huokoisuusvaihtelut pystysuunnassa.

Silta	Etäisyys Yläpinnasta [mm]	Suojahuokos- määrä [%]	Kokonais- huokosmäärä *) [%]
Keltakallion s	10-35	9,1	22,9
	175-200	5,8	19,8
	345-370	4,9	14,6
Karhunkankaan s.	10-35	13,2	22,5
	175-200	5,8	19,2
	350-375	6,0	17,7
Sakin s.	10-35	6,6	18,2
	245-270	9,0	21,2
	505-530	7,7	19,8
	750-775	5,5	15,6

\*) Suoja-, tiivistys-, kapillaari- ja geelihuokosissa oleva ilmamäärä

Tulosten mukaan betonin ilmamäärät kannen yläpinnassa ovat suuria. Alapinnassa ilmamäärät ovat hyviä. Näytekohtaiset tulokset on esitetty yksityiskohtaisemmin väliraportissa, [1].

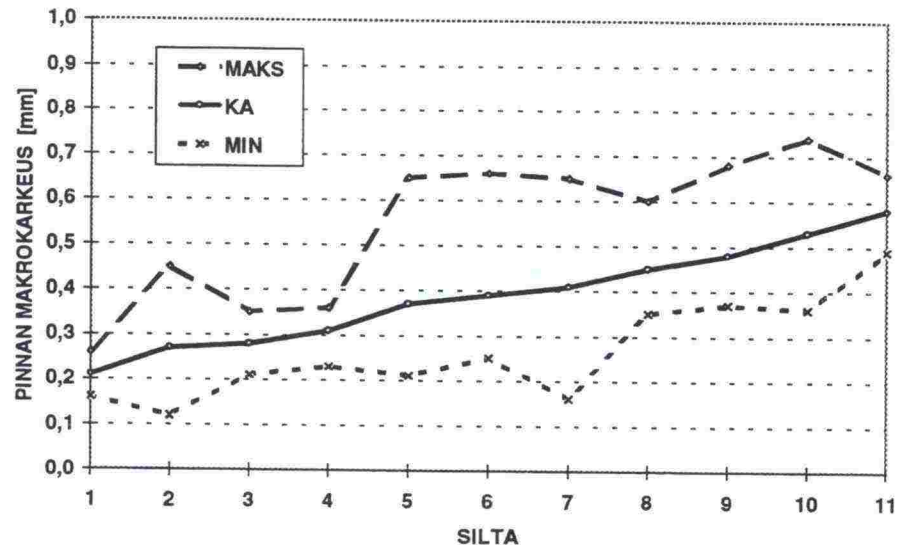
Huokoisuustutkimuksen kesillä (Aseman s.) kannen suojahuokosilmamäärät olivat hyviä ja erittäin tasaisia. Ylä- ja alapinnan välillä suojahuokosilmamäärissä ei ollut mainittavia eroja. Kapillaarisen vedelläkylästyskokeen tulosten mukaan suojahuokosilmamäärät olivat välillä 2,6-4,3 %. Kannen betonin tavoiteilmamääräksi oli asetettu 2,9 %. Sillan yläpinnan siinä osassa, missä oli käytetty huokostamaton betonia, ei ollut suojahuokosia, [45].

## 3.3.3.6 Eristysalustan pinnan karkeus

Karkeusmittaustulokset tutkimussilloilta (noin 5 mittausta/silta) on esitetty kuvassa 40 ja taulukossa 18.



Suomessa ei ole asetettu eristysalustalle numeerisia karkeusvaatimuksia. Saksassa ja Ranskassa on asetettu karkeudelle suurimmat sallitut arvot, mutta ei minimivaatimusta. Näiden vaatimusten mukaan kaikki siltakannet olivat pintakarkeudeltaan hyviä. Hyvin sileä pinta vaikeuttaa kuitenkin hyvän tartunnan aikaan saamista eristyksen ja alustan väliin. Siksi sileillä pinnoilla on erityisen tärkeää varmistaa eristyksen hyvä tartunta alustaan tartuntavetokokeiden avulla.



Kuva 40. Kannen betonipinnan makrokarkeus.

Taulukko 18. Kannen betonin tai tiivistysepoksen pinnan makrokarkeus (lasihelmimenetelmä PANK 5103).

Paikka	Rak. vuosi	Silta	Hiekka-puhall.	Pinnan makrokarkeus, mm		
				minimi	ka	maks.
Turun piiri/ vt 1	1996	S103 Hippoksen rs	On	0,36	0,53	0,74
	1996	S101 Kupittaaan s.	-"	0,35	0,45	0,60
	1997	S104 Lepikon akk		0,23	0,31	0,36
Hämeen piiri/ vt 3	1996	S505 Nummen rs	On	0,12	0,27	0,45
	1996	S605 Lepolahden s	-"	0,16	0,21	0,26
	1996	S611 Puhkan rs	-"	0,21	0,37	0,65
	1997	S820 Patrun rs betoni epoksi ulk epoksi hallissa		0,25	0,39	0,66
				0,57	0,73	0,90
				0,47	0,52	0,59
KaS	1997	S3 Paason rs/ epoksi		0,36	0,47	0,66
Oulun piiri	1997	S22 Yläsiirtolan ylik.s	Ei	0,49	0,58	0,66
	1997	S21 Kasarmint.ylik. s.	Osittain	0,21	0,28	0,35
	1997	S 14 Oulun rs I	On	0,16	0,41	0,65
Järvenpää	1997	Kyrölän ylik.käyt.	Ei	0,37		0,68

Lasihelmimenetelmän (PANK-5103) varsinainen käyttöalue on pinnoilla, joilla karkeuden keskisyvyys on välillä 0,25 - 5 mm. Jos menetelmän mukaan määritetty pinnan karkeus on alle 0,25 mm, kertoo menetelmä, että pinta on hyvin sileä, mutta saatu luku ei tällöin enää ole tarkka arvo.

### 3.3.3.7 Kumibitumin laatu

Tutkittujen kermien liimauskumibituminäytteiden pehmenemispiste ja palautuma on esitetty taulukossa 19. Yhdellä sillalla (Kasarmintien ylikulkusilta) liimauskumibitumin pehmenemispiste ja palautuma alittivat merkittävästi SYL 6:n vaatimuksen. Tämä näyte oli kaavittu sillan kannelta runsaasti kuplineen aluskerman alta. Sittemmin sillan aluskermi poistettiin kokonaan runsaan kuplimisen vuoksi.

Taulukko 19. Kumibituminäytteiden pehmenemispiste ja palautuma.

	Kumibit. näyte otettu	Liimauskumibitumin	
		pehmenemispiste (°C)	palautuma %
Sakin silta	kermistä	87	75
Ahrolan silta	säkistä	106	92
	padasta	89	83
S3 Heinola <sup>*)</sup>	padasta	96	84
S6 Heinola <sup>*)</sup>	padasta	95	80
Kärkistensalmen s.	kannelta	77	66
	padasta	80	75
Kärkistensalmen s. <sup>*)</sup>	padasta	90	81
	tehtaalla	104-105	88
	padasta	94	83
Raippaluodon s.	säkistä	112	96
	padasta	104	93
	padasta	98	88
Kasarmintien s.	kannelta	49	47
Patrun s.	säkistä	106	90
	padasta	81	68
Jurvansalon rs.	säkistä	106	92
	padasta	93	84
	padasta	92	81
Vaatus (SYL)		≥ 94	≥ 60

\*)

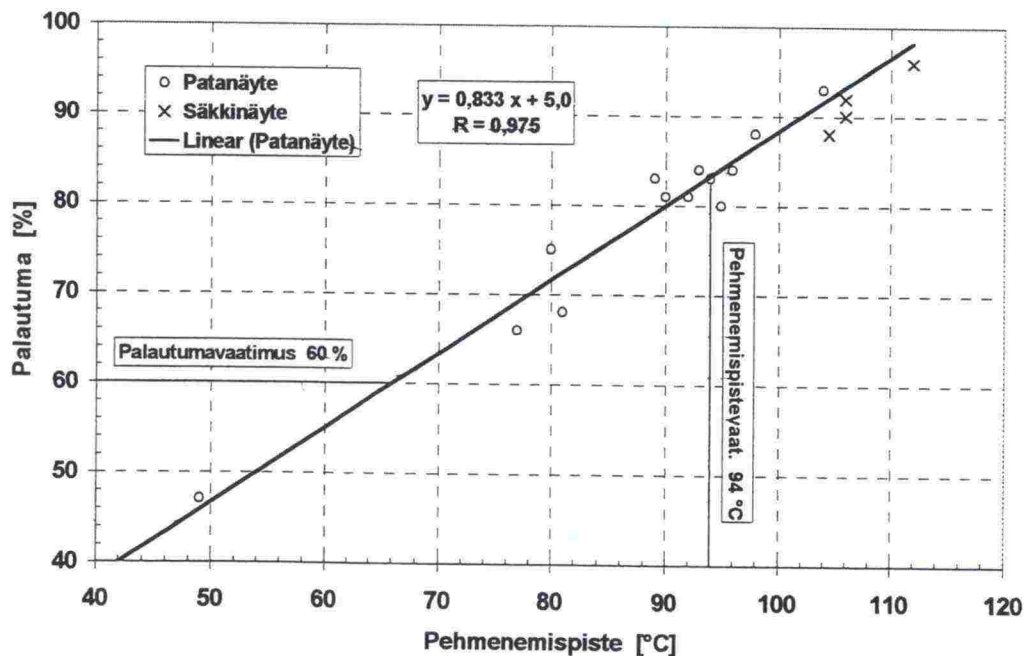
Katepal Oy:n tutkimustulos



Kumibitumin laatuvaatimuksista poikkeaminen voi johtua ylikuumentamisesta, koska tällöin kumibitumin rakenne voi löystyä ja pehmenemispiste laskee tuntuvasti. Rakenteen löystyminen ja palautumattomuus edisti Kasarmintien sillalla aluskerrin kuplimista, joka oli todettu noin kolme viikkoa eristuksen asentamisen jälkeen. Käytettävissä ei ollut vertailunäytettä kuumentamattomasta, säkistä otetusta kumibitumista. Kolmen muun sillan padasta otettu tai siltakannesta kaavittu ja yhden sillan kermistä kaavittu näyte ei täyttänyt kumibitumin KB-100 pehmenemispistevaatimusta.

Kuvassa 41 on esitetty eristysvauriokohteista (kupliminen tai tartunnan alitus) padasta otettujen tai siltakannesta kaavittujen kumibituminäytteiden palautuman riippuvuus pehmenemispisteestä. Vauriokohteiden padasta otettujen näytteiden palautuma korreloi pehmenemispisteen kanssa. (Tässä regressioaineistossa on mukana myös siltakannesta kaavitut kumibituminäytteet). SYL 6:n palautumavaatimus on huomattavan lievä pehmenemispistevaatimukseen verrattuna kuvan 41 perusteella. Jatkotutkimuksissa olisi syytä selvittää, miten pehmenemis- ja palautumaominaisuuksien aleneminen lämpökäsittelyssä vaikuttaa kerrin tartuntaan tai kuplimisherkkyyteen. SYL 6:ssa ei ole vaatimusta liimausbitumin lämpövanhennuksen kestävyydelle.

Ruotsin siltaohjeiden [8] mukaan kumibitumin pehmenemispiste saa alentua enintään 10 °C lämpövanhennuksessa (70 °C, 6 kk). Tämä vaatimus mittaa kuitenkin hieman eri ominaisuutta kuin työmaalla padassa tapahtuva lämpövanhennus sallituissa tai yilämpötiloissa.



Kuva 41. Kumibitumin KB100 palautuman riippuvuus pehmenemispisteestä eristysvauriokohteissa.

## 4 YHTEENVETO

### 4.1 Yleistä

Siltojen vedeneristyskermien kuplimisilmiöiden selvitystutkimuksen tavoitteena oli selvittää kuplimisen syyt ja tuottaa keinot rakentamis- ja korjausasiakirjojen tarkistamista varten ongelman ratkaisemiseksi. Tutkimusprojektin rahoitti Tielaitoksen siltayksikkö ja se toteutettiin v. 1996-98 VTT:n Yhdyskuntatekniikan ja Rakennustekniikan tutkimusyksiköiden yhteistyönä.

Tutkimus sisälsi esiselvityksenä eri maiden vedeneristysmenetelmien ja Suomen silloilla todetun kuplimisongelman kartoituksen sekä aiemmin tästä aiheesta tehtyjen koti- ja ulkomaisten tutkimusten analyysin. Tutkimuksen kokeellinen osa ja teoreettiset tarkastelut sisälsivät 13 erillistä osatutkimusta, joissa yhdistettiin sekä betoni- että eristystekniset tutkimusmenetelmät samaan projektiin.

Kuplimisilmiötä tarkasteltiin sekä teoreettisin laskelmin että kokeellisesti. Projektissa suunniteltiin ja kehitettiin eristysrakenteiden kuplimisominaisuuksien tutkimiseen soveltuva simulointilaite- ja menetelmä sekä otettiin käyttöön ensi kertaa Suomessa betonirakenteiden kosteusmittaukseen soveltuva jatkuvatoiminen mittausmenetelmä.

### 4.2 Esiselvityksen yhteenveto

Polymeerimodifioidut kermiit ovat yleinen eristysmateriaali Euroopassa. Yleensä niiden alla käytetään tartunta-aineena bitumi- tai kumibitumiliuosta tai tiivistepoksia. Eristysolosuhdevaatimukset vaihtelevat eri maissa. Suomen olosuhdevaatimukset eivät ole kuitenkaan tiukempia kuin yleensä Euroopassa.

Työmaakyselyn tuloksista tulee selvästi ilmi kuplimisen ajoittuminen erityisesti vuosille 1994-95. Kuplineista eristyksistä suurin osa oli tehty vähintään vuotta ennen kuplien havaitsemista. Vuonna 1995 olivat sääolosuhteet kuplimisen kannalta otolliset ja kupliminen yleistä, mutta tuolloin tehdyistä eristyksistä ei ole yhtään kuplimishavaintoa asennusvuoden aikana. Vuoden 1997 hellekesänä kuplivat kuitenkin runsaasti myös vuosina 1995-96 asennetut kermiit.

Betonin tai eristyskermien materiaalien mahdollinen vaikutus kuplimiseen ei tullut työmaakyselyssä esiin, koska kuplimattomista silloista saatiin palaute vain osalta silloista ja koska eri materiaalien käytön yleisyydestä ei ollut dokumentoitua tietoa. Tarkempia tuotemerkkikohtaisia johtopäätöksiä ei myöskään voitu tehdä, koska ei ollut tietoa eri tuotemerkkien markkinaosuuksista kaikilla silloilla.

Koska kaikkien kuplimattomien siltojen eristysalustat oli hiekkapuhallettu, voidaan hiekkapuhalluksen päätellä vähentävän kuplimisriskiä. Koska kuitenkin noin joka toisen kuplineenkin sillan eristysalusta oli hiekkapuhallettu, voidaan todeta, ettei hiekkapuhallus suinkaan riitä varmistamaan eristyskermien kuplimattomuutta.



Eristysalustan kosteuden mittaaminen on työmailla vielä suhteellisen harvinaista. Selkeä puute on, ettei yhdelläkään eristystyömaalla oltu määritetty kastepistelämpötilaa. Kastepistelämpötilan määrittämiseen eristystyömailla tulisi kiinnittää nykyistä enemmän huomiota. Vaikka se on hyvä, nopea, ainetta rikkomaton ja helppo eristysolosuhteiden testimenetelmä, sitä ei käytetä.

Kirjallisuusselvityksen mukaan:

- Kermieristysten kupliminen on tiedostettu ongelma useissa maissa.
- Kermieristysten kuplimisen syitä ovat mm. betonin kosteus, betonipinnan jälkihoitoainejäämät ja liian karkeapintainen alusta, eristyksen asentaminen liian kylmällä säällä, osmoosipaineet betonissa, bitumipohjaisten pohjustusaineiden liuottimet ja kermin alle asennustyön yhteydessä jäävät ilmataskut.
- Kuplien syntymistä edistävät mm. eristyksen heikko tai ajan mittaan heikentynyt tartunta alustaan, lämpötilavaihtelut sekä eristyksen, suojakerroksen teon ja päällystyksen pitkä aikaväli.
- Kermieristysten kuplimisen välttämiseksi Saksassa ja Itävallassa betonipinta tiivistetään epoksilla ennen eristyksen asentamista. Epoksi tiivistys edellyttää hyviä levitysolosuhteita ja siksi myös Saksassa käytetään epoksin asennuksen ja tiivistyksen suojana usein sääsuojaa tai telttakatosta. Tanskassa pidetään akryylipohjaista primeriä parempana kuin bitumiliuosta. Useissa maissa betonipinnan jälkihoitoaineet on kielletty. Eristysalustan pinnasta on suositeltavaa poistaa sementtiliima esim. hiekkapuhalluksella.
- Perusedellytyksiä onnistuneelle työn lopputulokselle on eristysolosuhteiden mittaaminen, olosuhdesuosituksen noudattaminen, korkealuokkaiset materiaalit ja asentajien ammattitaito. Käytännön toimenpiteitä näiden edellytysten luomiseksi ovat materiaalien valinta ennakkotestauksen perusteella ja henkilöstön koulutus.

Muissa maissa saatujen kokemusten soveltamista suoraan Suomen käytäntöön vaikeuttavat mm. erot sääolosuhteissa, eristysmateriaaleissa ja työmenetelmissä sekä eri asiantuntijoiden osittain keskenään ristiriitaiset näkemykset kuplimisongelman oikeasta ratkaisutavasta.

## 4.3 Lämpötila ja kosteustutkimusten yhteenveto

### Lämpötilat ja paineet laatan yläpinnassa

Eristeen irtoamisen kannalta korkeimmat lämpötilat ja suurimmat paineet syntyvät eristämisen ja asfaltoinnin välisenä aikana. Tällöin päivittäiset maksimilämpötilat eristeen alla voivat olla jopa 50°C. Eristeen alle jäävien ilmarakkuloiden sisällä kaasun ylipaine on tällöin suuruusluokkaa 0,03 MPa, joka on riittävän suuri nostamaan koholleen asfalttipäällysteen, jos eriste on irti alustasta.

Jos kermieristuksen yläpinnan väri vaalennettaisiin esim. vaalealla pintasirotteella tai vaalealla peitteellä, voitaisiin alentaa eristysalustaan kehittyviä paineita ja irtoamisriskiä eristämisen ja asfaltoinnin välisenä aikana.

Asfaltoinnin jälkeen lämpötilat eristeen tasossa ovat alhaisempia kuin ennen päällystystä, koska asfalttikerroksella on eristävä vaikutus betonin lämpötiloihin. Asfaltin levittämisen jälkeen lämpötilat ovat tehtyjen teoreettisten laskelmien mukaan korkeimmillaan suuruusluokkaa 35 °C, josta johtuva ylipaine eristuksen alla on noin 0,02 MPa. Päällystystyöt voivat kuitenkin aiheuttaa kertaluoteisesti suuren lämpörasituspiikin.

Kenttämittaukset vahvistavat edellä mainittuja teoreettisesti tehtyjä arvioita. Oulussa Kasarmintien sillalla mitattiin eristuksen jälkeen laatan yläpinnassa maksimissaan hieman yli 40 °C:n lämpötiloja ja asfaltoinnin jälkeen seuraavana vuonna 33 °C:n lämpötiloja. Tuusulantien siltatyömaalla eristystyöt suoritettiin niin myöhään kesällä (elo-syyskuun vaihteessa), että huippulämpötiloja ei voitu todeta. Viimeksi mainitulla sillalla mitattiin kuitenkin kerta-luontoisesti eristystyöstä johtuva 58 °C:n lämpötilapiikki.

#### Suhteelliset kosteudet

Teoreettisten laskelmien mukaan suhteelliset kosteudet laatan yläpinnassa eristuksen jälkeen vaihtelevat ensimmäisenä vuonna välillä 90 - 100 %. Terminen kosteudenjohtavuuden johdosta suhteellinen kosteus laskee kesällä ja nousee hieman talvella. Laskelmien mukaan laatan yläpinnan suhteellinen kosteus laskee vähitellen siten, että kolmantena vuonna se oli enää välillä 75 - 80 %. Laatan keskellä ja alapinnassa suhteellinen kosteus saavuttaa tasapainon varsin pian välillä 85 - 87 %.

Kenttämittaukset pitivät osittain yhtä teoreettisten laskelmien kanssa. Kasarmintien sillalla laatan alapinnassa suhteelliset kosteudet vaihtelivat välillä 80 - 90 % riippuen mittauskohdasta ja mittausvyvyydestä. Päivittäiset vaihtelut olivat selviä, mitä ei todettu teoreettisissa laskelmissa. Tämä johtuu siitä, että teoreettisissa laskelmissa lämpötilan muutoksen ei oleteta aiheuttavan välitöntä muutosta suhteelliseen kosteuteen, vaan muutos syntyy ainoastaan hitaasti kosteuden liikkeen kautta.

Laatan yläpinnassa suhteelliset kosteudet olivat korkeammat kuin teoreettisten laskelmien pohjalta voitiin päätellä. Sekä Kasarmintien että Tuusulantien sillalla suhteellinen kosteus nousi eristuksen jälkeen lähelle mittausalueen ylärajaa (98 %). Kuivuminen laatan eristuksen alla oli hyvin hidasta. Laskennallisen ja kokeellisen kosteuspitoisuuden ero saattaa johtua siitä, että kosteuden johtuminen ja terminen kosteuden johtuminen on arvioitu todellista nopeammaksi. Ajan mukana suhteellisen kosteuden pitäisi kuitenkin hitaasti laskea laatan yläpinnassa.

Sekä Kasarmintien että Tuusulantien sillalla hydrataatiokuivuminen oli selvä ja yhtäpitävä teoreettisten laskelmien kanssa.



Kasarmintien sillalla kannen yläpinnasta 20 mm ja 50 mm syvyyksiltä mitattujen RH-käyrien avulla todettiin yläpinnassa kosteusgradientti ennen kermin asennusta. Kermin asennuksen jälkeen anturit näyttivät melkein samaa korkeata arvoa eikä gradientin olemassaoloa voitu enää todeta.

Pian kermin asennuksen jälkeen Kasarmintien sillalla todettiin kuplimisvaurio. Kermieristys, joka todettiin myöhemmin virheellisesti asennetuksi, poistettiin ja silta eristettiin uudestaan. Uudessa eristyksessä ei ole todettu kuplimisvaurioita.

#### Kosteusmittaukset

Betonirakenteiden kosteusmittaus ulkoilmaolosuhteissa on vaativampaa kuin sisäilmaolosuhteissa lämpötilan vaihteluiden johdosta. Lämpötilan muutos aiheuttaa suhteellisen kosteuden mittaussarvoon muutoksen, jonka suuruus ja suunta on oltava hallinnassa. Lisäksi luotettavan mittaustuloksen saamiseksi on anturin ja betonin lämpötilojen oltava samat. Jos kosteusanturin lämpötila on korkeampi kuin betonin lämpötila, on suhteellisen kosteuden mittaustulos pienempi kuin betonin todellinen kosteus. Jos esimerkiksi lämpötilaero on 1°C, voi suhteellisen kosteuden virhe olla jopa 5 %, [40].

Tutkimuksessa verrattiin kolmea kosteusanturia keskenään vaativiin ulkoilmaolosuhteisiin sopivien mittausten menetelmien selvittämiseksi. Seuraavassa esitetään vertailusta tehdyt päätelmät:

- AHEAD Hygrotemp II-anturilla ja Vaisala HMP 44 jatkuvatoimisilla antureilla mitatut lämpötilat lähellä yläpintaa vaihtelivat enemmän kuin MS Sensor-anturilla mitatut lämpötilat. Tämä johtuu pääasiassa lämmön kulkeutumisesta ulkoilmasta anturiin. MS Sensor-anturin voidaan olettaa näyttävän betonin todellista lämpötilaa, koska se on valettu betonin sisään.
- AHEAD Hygrotemp II ja Vaisala HMP 44-antureilla lämpötilavirhe aiheuttaa virheen myös suhteellisen kosteuden mittaussarvoissa. Virhe on tavanomaisia mittausten menetelmiä käytettäessä selvä, mutta sitä voidaan pienentää parantamalla mittauskohdan lämmöneristystä.
- AHEAD Hygrotemp II-anturilla ja Vaisala HMP 44 jatkuvatoimisilla antureilla suhteellinen kosteus betonissa pienenee lämpötilan kasvaessa ja vastaavasti kasvaa lämpötilan pienenessä. Vaikka ulkoilmassa näin tulee tapahtua, betonissa tasapainokosteuskäyrät kulkevat siten, että muutoksen tulisi olla päinvastainen [41]. Tässä suhteessa MS Sensor-anturi toimii teorian mukaisesti ts. sillä lämpötila ja suhteellinen kosteus muuttuvat samansuuntaisesti, [42, 44].

#### Eristysolosuhteet

Tehty säätilastaselvitys osoittaa, että Suomessa huhti-lokakuussa on keskimäärin alle 20 % vuorokaudesta Tielaitoksen ohjeiden olosuhdevaatimukset täyttävää eristystyöaikaa. Määrää on pidettävä erittäin vähäisenä ottaen huomioon vuosittaisen eristystyön tarpeen. Sääolosuhteiden perusteella

Helsingissä ja Jyväskylässä touko-kesäkuu on "normaalivuonna" eristystöille edullisempaa aikaa kuin heinäkuu. Töiden keskittäminen alkukesään on edullista työn laadun kannalta. Lyhyt työkausi ja töiden keskittäminen lyhyelle ajalle aiheuttaa kuitenkin ongelmia eristystöiden ajoituksen suunnittelussa ja toteutuksessa. Eniten töiden järjestelyä vaikeuttavat sateet. Pitkäaikaisia sadejaksoja saattaa esiintyä missä kuussa tahansa, jolloin eristystyöt estyvät.

Suomen olosuhteissa voitaisiin sääsuojilla lisätä huomattavasti sallittua eristystyöaikaa. Suojatuissa tiloissa eristystyö voitaisiin tehdä aina suunnitelmallisesti ja riskittömästi. Jos työmaalla ei ole sääsuojaa, on luultavaa, että hyväksyttävien olosuhteiden rajoja pyritään 'venyttämään', mikä saattaa kostautua myöhemmin eristysten kuplimisena.

#### Betonin kuivuminen

Kuivumiskokeessa kaikkien siltabetonien kuivuminen todettiin erittäin hitaaksi. 70 %:n suhteellisessa kosteudessa tehdyssä kuivumiskokeessa kuivuminen jatkui vielä kokeen päätyttyä 540 vuorokauden jälkeen. Huokoistetut betonit kuivuivat hieman huokoistamattomaa betonia nopeammin.

## 4.4 Työmenetelmätutkimusten yhteenveto

### Eristysalustan jälkihoito ja pinnan puhdistus

Koesillan eristys epäonnistui ja alkoi kuplia kauttaaltaan todennäköisesti aluskerman liimausbitumin ylikuumentamisen vuoksi. Tartuntakokeessa kerman irtoamistapa oli liimausbitumin leikkaantuminen. Näistä syistä eristysalustan jälkihoito- tai pinnan puhdistusmenetelmien vaikutukset eristystyön laatuun jäivät selvittämättä kokeellisesti. Kirjallisuusselvityksen mukaan suositeltavin jälkihoitotapa eristystyön kannalta on vesikastelu ja pinta suositellaan ennen eristystyötä puhdistettavaksi sinko- tai hiekkapuhalluksella.

### Sääsuoja

Sääsuojahallitutkimuksella pyrittiin vertailemaan sääsuojahallin vaikutusta eristysrakenteiden tartuntaan. Tätä vertailua vaikeuttivat olennaisesti mm. sekä itse sääsuojahallin että eristysalustan ja epoksin käsittelytyön puutteellisuudet. Puutteistakin huolimatta sääsuojan eristyksen laatua parantava vaikutus voidaan todeta tuloksista. Jos sääsuojahalli olisi ollut asianmukainen, olisi se edelleen parantanut sääsuojan asemaa tässä vertailussa.

### Eristysalustan pinnan kuivaus

Laboratoriossa tehdyn kuivaustutkimuksen perusteella voitiin tehdä seuraavat päätelmät:

- Nestekaasun palamistuloksena syntyvä vesihöyry ei siirry betoniin kuivauksen aikana.
- Kun betonin pinnan huokokset olivat täynnä vettä (kastelun jälkeen), betoni kuivui lämmitettäessä hitaammin kuin tilanteessa, jossa pintahuukosissa oli



vähän ilmaa, koska jälkimmäisessä tapauksessa haihdutuspinta-ala on suurempi.

Työmaalla tehdyn siltakannen kuivauskokeen perusteella voidaan tehdä johtopäätös, että oikein käytettynä ja riittävän varovasti lämmittäen kuumenuspintausta ei vaurioita eristysalustan betonipintaa. Tässä tapauksessa laite mahdollisti lumipeitteisen sillan kannen tehokkaan kuivauksen ja sillan eristämisen ilman sääsuojaa.

Vaikka betoni kestääkin varovasti suoritettua lämmityksen, sisältyy kylmän sään eristystöihin aina laaturiskejä. Tästä syystä voidaan eristystöiden laadun kannalta pitää parempina vaihtoehtoina sääsuojaa tai eristystöiden ajoitusta lämpimään vuodenaikaan.

#### Kermin levitysmenetelmät

Levitysvaunulla levitetty aluskermi tarttui huomattavasti huonommin kuin muilla menetelmillä asennettu. Levitysvaunun heikoimpaan tulokseen vaikutti eristettävän sillan pieni koko. Laitteen poltintehoja ei ehditty kunnolla säätää ennen kuin koealue oli jo lähes levitetty. Levitysvaunu ei ole pienten siltojen työkalu.

Vetoaisa oli helppokäyttöinen ja toimiva kermin asennuksen apuväline. Vetoaisalla voidaan myös jyrätä kermiä kiinni alustaan, jos kermirullan sisään työnnettävä tela tehdään paksusta rautatangosta.

Levityskokeilun tulosten käyttökelpoisuutta heikentävät huonot eristysolosuhteet. Kannen pinta oli ennen eristystöiden aloitusta kastepistelämpötilassa (+5 °C). Kylmistä kermin asennusolosuhteista johtuen menetelmien eroja ei voida suoraan yleistää koskemaan lämpimällä säällä ja suuremmassa kohteessa tehtyihin asennuksiin. Asennusmenetelmävertailu olisi siksi suositeltavaa uusilla suuremmalla sillalla kesäolosuhteissa.

#### Eristysalustan laatu ja olosuhdemittaukset työmaalla

Ennen eristystöiden aloitusta tulisi pitää eristystöiden alkukokous, jonka yhteydessä tarkastetaan eristysalusta ja luovutetaan se eristysurakoitsijalle. Eristysalustan tulee täyttää SYL 6:n vaatimukset ennen eristämistä. Käytännössä on osoittautunut, että eristysalustan laadun kannalta päästään parhaaseen lopputulokseen vain, jos sekä rakennuttaja että eristysurakoitsija ovat mukana pääurakoitsijan tarkastaessa eristysalustan.

Kokouspöytäkirjaan tulisi merkitä kermin asennustyön käytännössä suorittavan henkilön nimi. Eristysurakoitsijan tulee alkukokouksessa osoittaa valmiutensa hoitaa myös asennustyön aikana tehtävät eristysolosuhdemittaukset (esim. pintalämpötilan, kastepistelämpötilan ja ilman kosteuden mittaamiseen). Eristystöiden alkaessa tarkastetaan, että bitumipata on varustettu sekoittimella ja termostaatilla ja että padan lämpömittari toimii.

## 4.5 Vaurio- ja laatututkimusten yhteenveto

### Kuplimisen kokeellinen simulointi laboratoriossa

Tutkimusta varten suunniteltiin ja rakennettiin kuplimissimulaattori, jolla pystyttiin kokeellisesti jäljittelemään kuplan syntymismekanismi ja selvittämään kuplimiseen vaikuttavia tekijöitä. Simulaattorissa tutkittiin 29 erilaista eristysrakennetta.

Simulaattorikokeen perusteella betonin huokoisuus vaikuttaa kermin kuplimisherkkyyteen, huokostetulla betonialustalla kermi kuplii herkemmin kuin huokostamattomalla. Epoksitiivistys kermin alla todettiin parhaaksi keinoksi estää kermin kupliminen. Simulaattorissa mitattiin myös betonin kosteutta jatkuvatoimisella MS-anturilla ja todettiin betonin suhteellisen kosteuden nousevan, kun lämpötila nousi kuten silloilla tehdyissä mittauksissa.

### Siltojen vauriotutkimukset

Kermin kuplien kohdilta otetuissa betoninäytteissä todettiin lähellä kannen pintaa suuria kokonaisilmamääriä, jopa 10 % tai suurempia. Betonin pintakerroksesta ei löydetty merkkejä liuotinainejäämistä. Kermien kuplien kaasuanalyseissa todettiin vesihöyryn aiheuttavan suurimman kaasun osapaineen kuplan sisällä näytteenottohetkellä.

### Kansibetonin huokoisuusvaihtelu pystysuunnassa

Sillan kannen läpi porattujen näytteiden huokoisuustutkimusten tulosten mukaan ilmamäärissä oli huomattavia eroja ylä- ja alapinnan välillä. Useissa tapauksissa kannen yläpinnan ilmapitoisuuden todettiin olevan kuplimisriskin kannalta haitallisen suuri. Syynä yläpinnan suureen ilmapitoisuuteen on ilmeisesti suurten ilmahuokosten nouseminen alemmista kerroksista. Alapinnan ilmamäärät olivat yleensä hyviä. Kohteessa, missä ylin kerros valettiin käyttäen huokostamatonta betonia, ilmaa ei noussut pintaan alemmista kerroksista.

### Eristysalustan pinnan karkeus

Eristysalustojen pintakarkeudet olivat esim. Saksan tai Ranskan vaatimuksiin verraten hyvällä tasolla. Tulosten perusteella voidaan esittää SYL:iin ohjeita tai vaatimuksia pintakarkeudelle.

### Kumibitumin laatututkimus

Kumibitumin laatutestit antoivat yhdellä sillalla selvän viitteen kuplimisen tai tartuntaongelmien syistä. Bitumitestit tuovat esiin merkittävästi kumibitumin ominaisuuksia heikentävän ylikuumentamisen ja antavat tällöin selvän viitteen ongelman aiheuttajasta. Vauriokohteesta otetun näytteen ominaisuuksia tulisi verrata samalla työmaalla säkistä otetun näytteen ominaisuuksiin. Vain neljällä sillalla kahdeksasta oli käytettävissä padasta otettu näyte. Vähäiset padasta otetun näytteen pehmenemispistevaatimuksen alitukset eivät vielä osoita varmuudella kumibitumin ylikuumentamista, koska laatuvaatimus on asetettu säkistä otetulle kumibituminäytteelle.



## 5 JOHTOPÄÄTÖKSET

Tutkimuksen perusteella on tehty seuraavat betonitekniset johtopäätökset:

- Siltakannen betonimassan ilmamäärä ei saisi ylittää sillan pakkasenkestävyyden perusteella asetettua ilmamäärävaatimusta yli 3 %-yksikköä eikä se saisi koskaan ylittää 7 %.
- Suojahuokosten kokojakaumaan tulee kiinnittää huomiota. Pakkasenkestävyyden kannalta tavoitteena tulee olla se, että huokosten keskinäinen välimatka betonissa on mahdollisimman pieni. Tämä saavutetaan silloin, kun ilmamäärä on jakaantunut mahdollisimman moneksi huokoseksi ts. huokosten lukumäärä on mahdollisimman suuri. Pienillä huokosilla saavutetaan myös se etu, että huokosten nouseminen ylöspäin vähenee.
- Pintakerrosten riittävästä ja oikea-aikaisesta tiivistyksestä on huolehdittava, sillä tiivistyksen parantaminen alentaa yläpinnan ilmamäärää. Pintakerroksen ilmamäärää tulisi seurata valun yhteydessä pintakerroksesta otettaville näytteille tehtävin ilmamäärämittauksin.
- Jälkihoitomenetelmänä lopullisen tärytyksen ja hierron jälkeen suositellaan kosteaa jälkihoitoa. Jälkihoitoaineen käyttöä tulisi välttää sen vaikean poistettavuuden takia.
- Eristysalustan pinnan karkeudelle tulisi asettaa ohjearvot: maksimiarvo on 1,5 mm ja hyvä 0,5 - 1,0 mm.
- Siltakansien kosteuden mittausrakenteista tulee antaa työmaille uudet ohjeet. Betonin kosteus on siltatyömaille suositeltavaa mitata betoniin valutuista antureista kannettavan näyttölaitteen avulla.

Eristysteknisinä johtopäätöksiä esitetään:

- Suositeltavin eristystapa kermieristyksen kuplien syntymisen estämiseksi suurella todennäköisyydellä Suomen sääolosuhteissa on, että eristykseen alle tehdään epoksitiivistys ja eristystyöt tehdään sääsuojassa noudattaen epoksimateriaalin käyttöohjeita, kumibitumin sallittuja lämpötiloja sekä käyttäen vain silloille hyväksytyjä materiaaleja.
- Märän betonipinnan eristäminen ei ole suositeltavaa. Koska SYL:n edellyttämiä sääolosuhteita on vaikea saavuttaa, on sääsuojan käyttö suositeltavaa. Sääsuojan käyttö tulisi esittää tarjouspyyntöasiakirjoissa.
- Kastepistelämpötila ja eristysalustan lämpötila tulisi mitata ja kirjata muistiin aina ennen eristystyöhön ryhtymistä ja toistuvasti eristystyön aikana.
- Kuplimisriski pienenee, jos eristykseen lämpötila ei nouse korkeaksi asennuksen jälkeen. Keinoina lämpötilan alentamiseksi eri vaiheissa on siirtyminen mahdollisimman vaalean pintakermin sirotteen käyttöön, asfaltointi viileällä säällä (yöllä) ja asfaltoidun kannen peittäminen vaalealla tuulettavalla peitteellä, jos siltaa ei ole avattu liikenteelle (esim. valkoinen suodatinkangas).

- Suositellaan, että pääurakoitsija, rakennuttaja ja eristysurakoitsija pitävät yhdessä ennen eristystöiden aloitusta eristystöiden alkukokouksen, jonka yhteydessä tarkastetaan, että eristysalusta täyttää vaatimukset ja että eristysurakoitsijalla on tarvittavat edellytykset ja välineet työn suorittamiseksi ja eristysolosuhteiden mittaamiseksi SYL:n edellyttämällä tavalla. Bitumipadat tulee varustaa sekoittimella ja termostaatilla. Eristystyön alkaessa tarkastetaan, että padan lämpömittari toimii.
- Eristystyön laatu tulee aina todeta kelpoisuuskokein ja mahdollisia lisäselvityksiä varten tulee eristystyömaalta ottaa SYL:n edellyttämät tarvittaessa myöhemmin tutkittavat näytteet.

Jatkotutkimuksina esitetään, että

- silloilla tehtäviä lämpötila- ja kosteustutkimuksia tulisi jatkaa
- työmaalle tulisi etsiä nykyistä parempia, kenttäkelpoisia kosteuden mittausten menetelmiä
- kermien asennusmenetelmiä tulisi tutkia hyvissä työolosuhteissa
- tulisi selvittää kumibitumin sulatuspadassa tapahtuvan pehmenemis- ja palautumaominaisuuksien alenemisen vaikutus kermien tartunta- ja kuplimisominaisuuksiin ja kumibitumin kylmäominaisuuksiin sekä mahdollinen kumibitumin laatuvaatimusten tarkistustarve tältä osin
- tulisi tutkia vaalean pintasirotteen vaikutus kermien lämpenemisominaisuuksiin ulko-olosuhteissa.



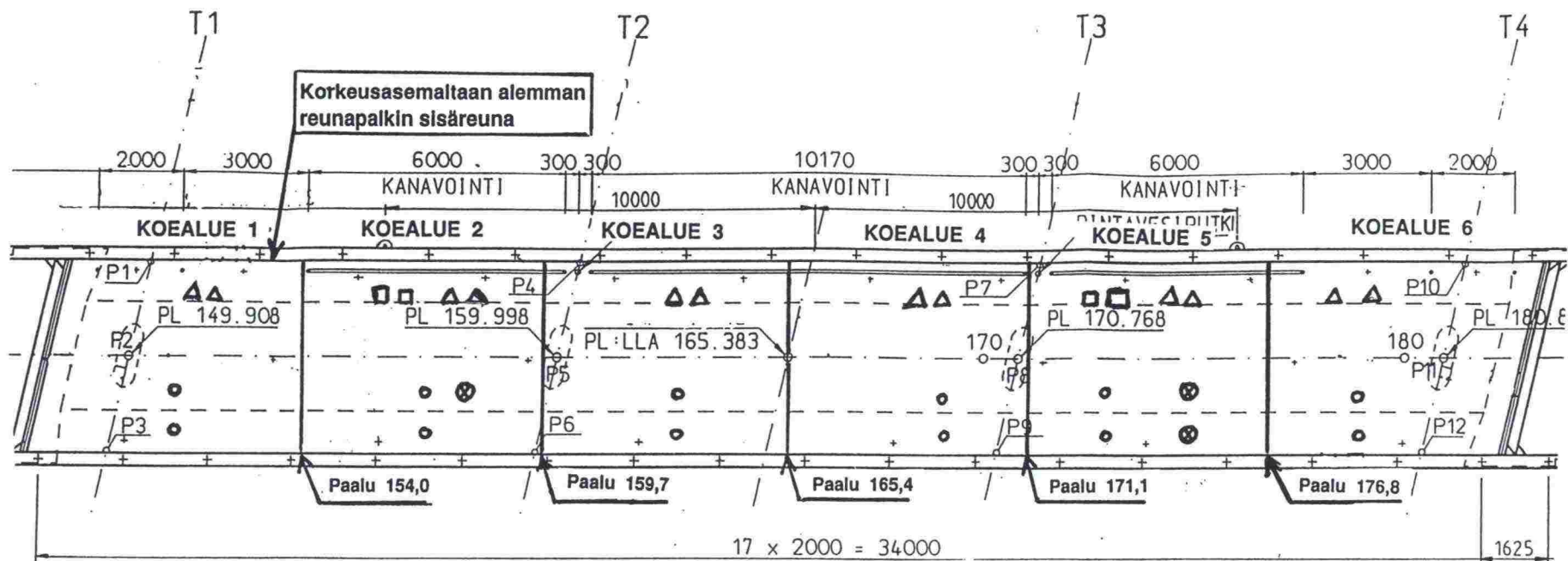
## 6 KIRJALLISUUSVIITTEET

- [1] Laukkanen, K., Paroll, H., Pitkänen, P., Raivio, P., Vesikari, E., Siltojen kermieristysten kuplimisilmiöiden selvitystutkimus, Espoo 1997. Väli­raportti 1, VTT Yhdyskuntateknikka, Tutkimusraportti 391, 97 s. + liitt. 3 s.
- [2] Laukkanen, K., Paroll, H., Pitkänen, P., Vesikari, E., Siltojen kermieristysten kuplimisilmiöiden selvitystutkimus, Espoo 1998. Väli­raportti 2, VTT Yhdyskuntateknikka, Tutkimusraportti 438, 111 s. + liitt. 28s.
- [3] Sillanrakentamisen yleiset laatuvaatimukset. Kannen pintarakenteet. Helsinki 1996. Tielaitos. SYL 6, TIEL 2210008-96.
- [4] Colldin, Y., Waterproofing system fo concrete bridges in Europe. Linköping 1996, CEN TC 254/ WG6.
- [5] Dichtungsschicht aus zweilagig aufgetragten Bitumendichtungsbahnen. Dortmund 1967, Der Bundesminister für Verkehr, Vorläufige Zusätzliche Technische Vorschriften und Richtlinien für die Herstellung von Brückenbelägen auf Beton, ZTV-BEL-B 2/87, Teil 2.
- [6] Edwards, Y., Blåsbildningsproblem vid isolering med polymerbitumenmatta. Bakgrund och undersökningar i laboratoriet. Specialistseminarium, Linköping 1996.
- [7] Jordan, R., Transport Research Laboratory (TRL), kirje TRR 06/004/0050/11.9.1996.
- [8] Allmän teknisk beskrivning för broar, 6. Brodetaljer. Borlänge 1994, Vägverket Publ 1994:6, BRO 94.
- [9] STER 81 sub-dossier E. Bagneux Cedex 1981, French Ministry of Transport, Bridge deck waterproofing, Chapter 4, Prefabricated sheets.
- [10] Vater, E.J., Neumann, B., Rother, M., Erarbeitung von Prüfkriterien für Betonbrückenabdichtungen mit vorgefertigten Dichtungsbahnen. Bonn-Bad Godesberg 1983, Bundesminister für Verkehr, Forschung Strassenbau und Strassenverkehrstechnik, Heft 397.
- [11] Laukkanen, K., Haimala, T., Kosteuden, lämpötilan, vedeneristyksen tartunnan ja paksuuden mitta­us siltatyömailla. Espoo 1993, VTT, Tie-, geo- ja liikennetekniikan laboratorio, tutkimusraportti 145.
- [12] Janssen, D., Bridge deck moisture measurement. Washington 1987, Washington State Department of Transportation, Final Report WA-RD 124.1.
- [13] Siltojen mikroilmasto, perusselvitys. Espoo 1992, VTT Rakennusmateriaalilaboratorio, Tutkimusselostus RAM 920/92.
- [14] Merikallio, T., Betonilattian kuivuminen päällystyskelpoiseksi ja kosteusmittaus. Hämeenlinna 1996, Rakentajan kalenteri 1997.

- [15] Nykänen, V., Lahdenperä, P., Nippala, E., Suomalainen kylmän il-  
masto rakennustekniikka, Osa 8. Työmaatekniikat. Espoo 1990, VTT  
Tiedotteita 1112.
- [16] Kokki, P., Mäkelä, H., Rakennusaikaisten lämmittimien valinta ja  
käyttö., Espoo 1982, VTT Tiedotteita 136.
- [17] Saksan liikenneministeriön kirje StB 25/38.55.10-17/93 Va  
96/5.8.1996.
- [18] Beton mit hohem Frostwiderstand, DIN 1045, kohta 6.5.7.3.
- [19] Sillanrakentamisen yleiset laatuvaatimukset. Betonirakenteet, SYL 3.  
Helsinki 1992, Tielaitos, Siltakeskus, TIEL 2210005.
- [20] Laamanen, P., Jälkihoidon merkitys betonirakenteiden korjauksessa.  
Helsinki 1992, TKK/ Rakennus- ja maanmittaustekniikan osasto, diplo-  
mityö.
- [21] Stevenson, A., Evans, W., The adhesion of bridge deck waterproo-  
fing materials. Crowthorne-Berkshire 1992, TRL Contractor Report  
325.
- [22] Zusätzliche Technische Vorschriften und Richtlinien für Schutz und  
Instandsetzung von Betonbauteilen, Dortmund 1967, Der Bundesmi-  
nister für Verkehr, ZTV-SIB 87.
- [23] Price, A., A field trial of waterproofing systems for concrete bridge  
decks. Crowthorne 1989, Transport and Road Research Laboratory,  
Report 185.
- [24] Über die Untersuchung einer Kunstharzbeschichtung auf  
Brückenbeton. Graz 1988, Technische Universität Graz, Bericht  
59.865/87/23.9.1988.
- [25] Colldin, Y., Isoleringssystem med polymerbitumenmatta på betongbro-  
ar - Vidhäftning med blåsbildningsproblem. Linköping 1995, VTI Notat  
nr. 23-1995.
- [26] Hensel, W., Blasenbildung bei organischen Beschichtungen auf ze-  
mentgebundenen Baustoffen, Betonwerk + Fertigteil-Technik 2/1995.
- [27] Rautiainen, L., Orantie, K., Uusien julkisivubetonien pinnoittaminen.  
Espoo 1995. VTT Rakennustekniikka, Loppuraportti.
- [28] Wruck, R., Untersuchung von Fahrbahnabdichtungen auf  
Betongbrücken. Bonn-Bad Godesberg 1987, Forschung Strassenbau  
und Strassenverkehrstechnik, Heft 510.
- [29] Jandu, A., Highways Agency, Englanti, kirje 5.8.1996.
- [30] Forholdregler for minimering af blister og buledannelse i fugtisolering.  
Roskilde 1993.



- [31] Thøgersen, F., Blistring i membraner til broisolering, Roskilde 1996. Vejdirektoratet, Vejteknisk Institut, Extern notat 3.
- [32] Fisher, F., (suomentanut Weckström, L.), Tiivistäminen maarakennuksissa ja tienpäälylystyksessä.
- [33] SILKO-toimikunta, Opintomatka Sveitsiin 12.-18.5.1997. Helsinki 1997, Matkakertomus.
- [34] Leinonen, T., Lattiapinnoitteen kupliminen voidaan estää. Rakennustaito 9/97. 2s.
- [35] Hensel W., Blister Formation with Organic Coatings on Cement-Bonded Materials. Betonwerk + Fertigteil-Technik. Heft 2/1995. Ss. 106-114.
- [36] Powers, T.C., The air requirement of frost-resistant concrete. Chicago 1949. Portland Cement Association, Research and Development Laboratories, Development Department. Bulletin 33.
- [37] Powers, T. C. & Helmuth, R. A., Theory of volume changes in hardened portland cement paste during freezing. Proceedings, Highway Research Board 32. 5, 1953, ss. 285 - 295.
- [38] Fagerlund, G., The critical degree of saturation method of assessing the freeze/thaw resistance of concrete. Tentative RILEM recommendation. Prepared on behalf of RILEM Committee 4 CDC. Matériaux et Constructions 1977 no 58. Ss. 217-229.
- [39] Ermittlung der Taupunkttemperatur, Verkehrsblatt 26(1971), H9, s. 254.
- [40] Hedenblad, G., Drying of construction water in concrete. Stockholm 1997. Byggnadsnämnden BFR (T 9:1997) 54 p.
- [41] Pihlajavaara, S. E., (1974). Lecture on practical estimation of moisture content of drying concrete structures. Concrete seminar. Technical Research Centre of Finland
- [42] Nilsson, L-O., Hygroscopic moisture in concrete - drying, measurements & related material properties. Lund 1980. Lund Institute of Technology. Division of Building Materials. Report TVBM-1003. 162 p.
- [43] Paroll, H., Measurement of relative humidity and temperature in new concrete bridges. Nordic Mini-seminar of the Nordic Concrete Federation, Espoo, Finland 22.8.1997. pp. 51 - 65.
- [44] Paroll, H. & Nykänen, E., Betonin suhteellisen kosteuden ja lämpötilan mittaamisesta silloissa. Rakennustaito 93(1998)5, 24 - 27.
- [45] Kansibetonin huokoisuuden tutkiminen. Espoo 1998, VTT Rakennustekniikka, tutkimusraportti RTE 30394/98.



# KASARMINTIEN YLIKULKUSILTA

siltatyömaa vt 4 Kiviniemi - Laanila

## KOEALUEIDEN SIJAINTI, JÄLKIHOITOMENETELMÄT JA PINNAN PUHDISTUSMENETELMÄT

KOEALUE		JÄLKIHOITOMENETELMÄ	PINNAN PUHDISTUSMENETELMÄ
NRO	PAALUVÄLI (m)		
1	n. 148 - 154,00	Kostea jälkihoito	Sinkopuhdistus
2	154,00 - 159,70	Kostea jälkihoito	Hiekkapuhallus
3	159,70 - 165,40	Kostea jälkihoito	Ei puhdistusta (Vain paineilmahuuhtelu)
4	165,40 - 171,10	Jälkihoitoaine	Sinkopuhdistus
5	171,10 - 176,80	Jälkihoitoaine	Hiekkapuhallus
6	176,80 - n. 182,70	Jälkihoitoaine	Ei puhdistusta (Vain paineilmahuuhtelu)

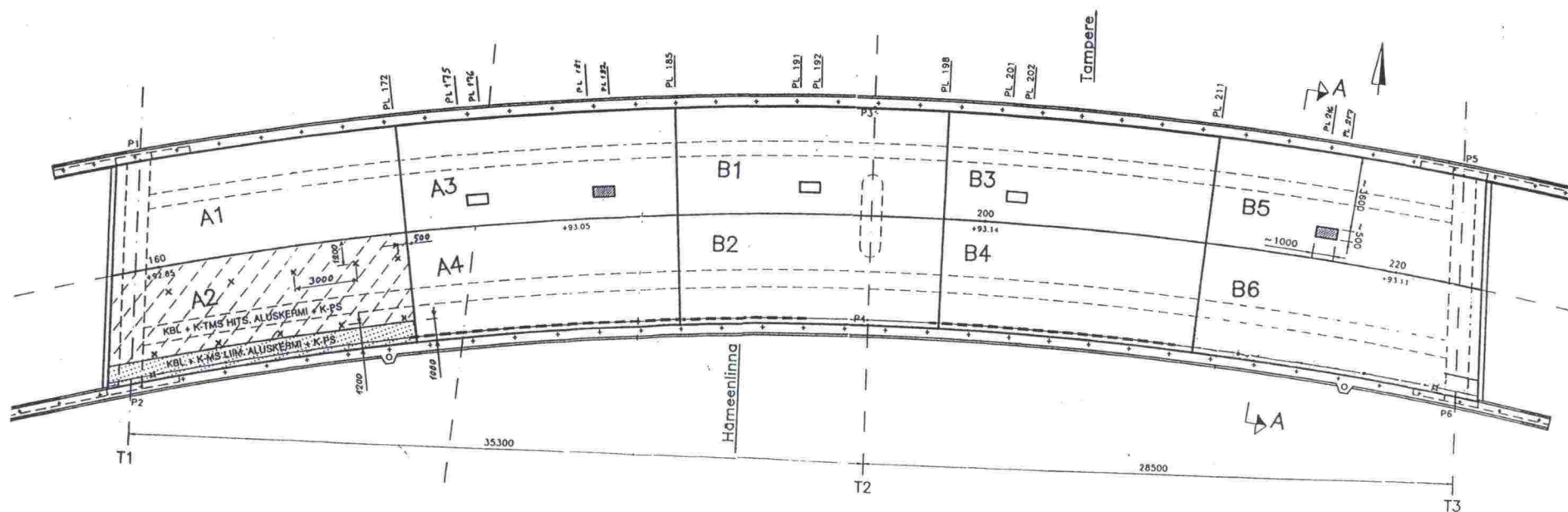
### MERKINTÖJÄ:

- △ kosteusmittaus porarellestä
- betoninäyte/ absol. kosteuden mittaus
- betoninäyte/ ohuthiekko
- ⊗ betoninäyte/ termoanalyysi

KASARMINTIEN YLIKULKUSILTA: KOEALUEET

LIITE 1





	Koealue	Eristysalustan tartunta- sively tai tiivistys	Aluskermi	Pintakermi	Huom
Ulkoalueet A1...A4 ja B1...B2	A1	KBL 20/100	K-ML hits	K-PS	K-ML on lasikangas- tukikerroskermi K-TMS on paineentasauskermi
	A2	KBL 20/100	K-TMS hits	K-PS	
	A3	epoksitiivistys	K-MS liim	K-PS	
	A4	epoksitiivistys	K-MS hits	K-PS	
	B1	KBL 20/100	K-MS liim	K-PS	
	B2	KBL 20/100	K-MS hits	K-PS	
Sääsuojahallilla katettu sillan osa B3...B6	B3	KBL 20/100	K-MS liim	K-PS	
	B4	KBL 20/100	K-MS hits	K-PS	
	B5	epoksitiivistys	K-MS liim	K-PS	
	B6	epoksitiivistys	K-MS hits	K-PS	

**S820 PATRUN SILTA**  
**KOEALUEET**

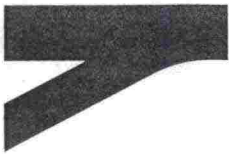
**LITE 2**

KOEALUEET: Menetelmillä 1 – 3 asennetut aluskermit





ISBN 951-726-474-7  
ISSN 0788-3722  
TIEL 3200536



Jakelussa mainitut

## Siltojen kermieristysten kupliminen

Tielaitoksen selvityksiä- sarjassa on ilmestynyt julkaisu: *Siltojen kermieristysten kuplimisen estäminen, loppuraportti (TIEL 3200536)*.

Siltojen kermieristeisiin on lämpiminä kesäpäivinä syntynyt kaasukuplia. Kuplat ovat nostaneet myös eristyksen päällä olevan asfaltin ylös, jolloin asfaltti on halkeillut ja purkautunut nopeasti liikenteen alla. Ongelman selvittämiseksi teetti siltayksikkö laajan tutkimuksen, jonka loppuraportti on liitteenä.

Tutkimus osoitti, että kupliminen on monen eri tekijän yhteisvaikutus. Yleisimpiä syitä ovat betonirakenteen suuri kosteuspitoisuus ja huokoisuus ja työvirheet.

Tutkimustulokset aiheuttavat muutoksia sillanrakentamisen yleisiin laatuvaatimuksiin (SYL). Ensimmäiset muutokset on jo ilmoitettu siltayksikön kirjeellä 98/20/Hsi-114, pvm. 27.4.1998. Lopulliset muutokset tehdään uusittaessa sillanrakentamisen yleiset laatuvaatimukset vuoden 1999 aikana.

Julkaisua koskeviin tiedusteluihin vastaa Jouko Lämsä, puh. 0204 44 2624, e-mail [jouko.lamsa@tieh.fi](mailto:jouko.lamsa@tieh.fi)

Apulaisjohtaja  
Siltayksikkö



Juhani Vähäaho

Diplomi-insinööri  
Siltayksikkö



Jouko Lämsä

LIITE *Siltojen kermieristysten kuplimisen estäminen, loppuraportti*

JAKELU Tiepiirit  
Tuotannon yksiköt  
Konsultointi  
Ratahallintokeskus  
Oy VR- Rata Ab  
Helsingin kaupungin rakennusvirasto / Siltatoimisto

Keskushallinto  
Siltayksikkö  
Opastinsilta 12 A  
PL 33  
00521 HELSINKI

Puhelin  
0204 44 150

Telefax  
0204 44 2395

Sähköposti  
[etunimi.sukunimi@tieh.fi](mailto:etunimi.sukunimi@tieh.fi)



Tutkimusprojektin johtoryhmän jäsenet  
SILKO-pintarakennetyöryhmä  
SILKO- toimikunta  
Kirjasto (2kpl)  
Hsi /tekniset

JoL

**TIRKKONEN, Timo: Betonisiltojen vahventaminen hiilikuiduilla.** Loppuraportti. Helsinki 1999, Tielaitos/siltayksikkö. Tielaitoksen selvityksiä ../1999. 92 sivua + 16 liitesivua.

**Asiasanat** sillat, betonirakenteet, korjaus, vahventaminen, hiilikuidut

**TIRKKONEN, Timo: Strengthening of concrete bridges by carbon fibre reinforced polymers (CFRP).** Final report. Helsinki 1999, Finnish National Road Administration, Report .../1999. 92 p., 16 app.

**Key words** bridges, concrete structures, repair, strengthening, carbon fibre reinforced polymers